

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Electrónica, Robótica y
Automática.

Evaluación experimental de sensores para
la medida de deflexión articular

Autor: Manuel Pérez García

Tutores: Aníbal Ollero Baturone

Alejandro Suárez Fernández-Miranda

Departamento de Sistemas y Automática
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Electrónica, Robótica y Automática.

Evaluación experimental de sensores para la medida de deflexión articular

Autor:

Manuel Pérez García

Tutor:

Aníbal Ollero Baturone

Catedrático de Universidad

Alejandro Suárez Fernández-Miranda

Departamento de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Autor: Manuel Pérez García

Tutor: Aníbal Ollero Baturone

Alejandro Suárez Fernández-Miranda

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El secretario del Tribunal

Sevilla, 2018

Agradecimientos

Este trabajo está financiado por el proyecto Europeo H2020 AEROARMS (AERial RObotic system integrating multiple ARMS and advanced manipulation capabilities for inspection and maintenance) número de contrato 644271, AEROBI (AERial RObotic System for in-Depth Bridge Inspection by Contact, SI-1507/23/2015) y por los proyectos Españoles MINECO Retos AEROMAIN (DPI2014-5983-C2-1-R) y AEROCROS (DPI2015-71524-R).

En primer lugar, me gustaría mostrar mi mas sincero agradecimiento al profesor Guillermo Heredia Benot y a Alejandro Suárez Fernández-Miranda por haberme brindado la oportunidad de trabajar en un proyecto como este, así como formar parte del Grupo de Robótica, Visión y Control.

A mis familiares, en especial a mis padres, el apoyo y ánimo que he recibido de ellos durante todo el periodo académico y haber puesto a mi disposición los recursos que he necesitado durante estos en la universidad.

A mis amigos, por haber hecho más llevaderas las interminables épocas de exámenes.

Por último, agradecer también a mi pareja Aguas Santas su ánimo y cariño, sin los cuales no hubiese llegado tan lejos.

Este documento recoge el análisis, desarrollo y evaluación experimental de posibles soluciones para la medida de deflexión en las articulaciones flexibles de brazos robóticos de muy bajo peso diseñados para aplicaciones de manipulación aérea. El objetivo es estimar y controlar las fuerzas y pares ejercidos sobre el manipulador a partir de la deformación de un elemento elástico introducido en las articulaciones. La importancia de este trabajo reside en la necesidad de obtener una medida fiable, precisa y rápida sin comprometer la característica de bajo peso de los brazos, realizando las menores modificaciones estructurales posibles.

Se han propuesto distintas soluciones que pueden emplearse para este propósito, realizando pruebas extensivas sobre los dispositivos más adecuados para el montaje y decidiendo en última instancia la mejor de ellas en base a los resultados de los distintos tests. Se han considerado en un estudio preliminar diversos sensores entre los que se incluyen potenciómetros, codificadores magnéticos y sensores de distancia laser por tiempo de vuelo. Tras comparar sus características y considerar los requisitos de diseño impuestos por la aplicación, se ha decidido evaluar en profundidad los codificadores magnéticos AS5047D y los sensores de distancia VL6180X. En particular, se han obtenido resultados experimentales en diferentes condiciones de medida sobre el nivel de ruido, rango de operación, resolución, tasa máxima de lectura, o efecto de perturbaciones externas.

Abstract

This document includes the analysis, development and experimental evaluation of possible solutions for the measurement of the deflection in the flexible joints of very low weight robotic arms designed for aerial manipulation applications. The objective is to estimate and control the forces and torques exerted on the manipulator from the deformation of an elastic element introduced into the joints. The relevance of this work resides in the need to obtain a reliable, precise and fast measurement without compromising the low weight feature of the arms, making as few structural modifications as possible.

Different solutions have been proposed to achieve this purpose, carrying out extensive tests on the most suitable devices for assembly and ultimately deciding the best one based on the results of the different tests. Several sensors including potentiometers, magnetic encoders and time-of-flight laser distance sensors have been considered in a preliminary study. After comparing their characteristics and considering the design requirements imposed by the application, it was decided to evaluate in depth the AS5047D magnetic encoder and VL6180X distance sensors. In particular, experimental results have been obtained under different measurement conditions on noise level, operating range, resolution, maximum reading rate, or effect of external disturbances.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xxi
1 Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Uso de articulaciones flexibles. Compliance	1
1.3 Objetivos del proyecto	2
1.4 Estructura del documento	2
2 Software de desarrollo	3
2.1 SolidWorks	3
2.2 Ultimaker Cura	4
2.3 Atollic TrueSTUDIO Lite	4
2.3.1 STM32CubeMX.	5
2.3.2 Creación del proyecto	7
3 Hardware y sensores	15
3.1 Posibles soluciones	15
3.1.1 Sensores con contacto físico	15
3.1.2 Sensores sin contacto físico	18
3.2 Soluciones escogidas	19
3.2.1 Encoder magnético AS5047D	19
3.2.2 Sensor VL6180X	25
3.2.3 Giróscopo MPU6050	30
3.2.4 Microcontrolador STM32L031K6	34
4 Software del microcontrolador	37
4.1 Librería "stm32l0xx_hal.h"	37
4.2 Librería "lectura.h"	38
4.3 Librería "structures.h"	40
4.4 Librería "comunicacion.h"	40
5 Setup de pruebas	41
5.1 Encoder magnético AS5047D	41
5.2 Sensor ToF VL6180X	43
6 Resultados	47
6.1 Encoder magnético AS5047D	47
6.1.1 Característica de ruido estática	47

6.1.2	Resistencia a interferencias magnéticas externas	50
6.1.3	Exactitud de la medida	53
6.1.4	Comportamiento dinámico.	57
6.2	<i>Sensor ToF VL6180X</i>	59
6.2.1	Rango de operación	60
6.2.2	Exactitud de la medida	63
6.2.3	Característica de ruido estática y resistencia a interferencias externas.	69
7	Conclusiones	81
	Referencias	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Configuración bus I ² C.	10
Tabla 2. Configuración bus SPI.	10
Tabla 3. Configuración UART.	11
Tabla 4. Configuración reloj de sistema.	12
Tabla 5. Campos de la trama de petición lectura/escritura	22
Tabla 6. Campos de la trama de respuesta del sensor	23
Tabla 7. Campos trama de escritura	23
Tabla 8. Campos del registro 0x3FFE del AS5047D	24
Tabla 9. Campos del registro 0x3FFC del AS5047D	24
Tabla 10. Campos del registro 0x0016 del AS5047D	24
Tabla 11. Campos del registro 0x0017 del AS5047D	25
Tabla 12. Campos del registro 0x0015 del VL6810X	28
Tabla 13. Campos del registro 0x0018 del VL6180X	28
Tabla 14. Campos del registro 0x0024 del VL6180X	28
Tabla 15. Campos del registro 0x004D del VL6180X	29
Tabla 16. Campos del registro 0x004F del VL6180X	29
Tabla 17. Campos del registro 0x0062 del VL6180X	29
Tabla 18. Campos del registro 0x0097 del VL6180X	29
Tabla 19. Campos del registro 0x6B del MPU6050	33
Tabla 20. Campos del registro 0x6B del MPU6050	34
Tabla 21. Relación de pines utilizados en el montaje	35
Tabla 22. Resultados medida estática 180° sin interferencia a 2mm.	48
Tabla 23. Resultados medida estática 180° sin interferencia a 2mm descentrado	49
Tabla 24. Resultados medida estática 180° sin interferencia a 4mm	49
Tabla 25. Resultados medida estática 180° sin interferencia a 4mm descentrado	50
Tabla 26. Resultados medida estática 180° con interferencia a 2mm	51
Tabla 27. Resultados medida estática 180° con interferencia a 2mm descentrado	52
Tabla 28. Resultados medida estática 180° con interferencia a 4mm	52
Tabla 29. Resultados medida estática 180° con interferencia a 4mm descentrado	53
Tabla 30. Resultados medidas 0 a 360 imán a 2mm centrado	54
Tabla 31. Resultados medidas 0 a 360 imán a 2mm descentrado	55
Tabla 32. Resultados medidas 0 a 360 imán a 4mm centrado	56
Tabla 33. Resultados medidas 0 a 360 imán a 4mm descentrado	57
Tabla 34. Límites de medida para rango 0–200mm objetivo oscuro.	60

Tabla 35. Límites de medida para rango 0-200mm objetivo claro.	61
Tabla 36. Límites de medida para rango 0-400mm objetivo oscuro.	61
Tabla 37. Límites de medida para rango 0-400mm objetivo claro.	62
Tabla 38. Límites de medida para rango 0-600mm objetivo oscuro.	62
Tabla 39. Límites de medida para rango 0-600mm objetivo claro.	63
Tabla 40. Exactitud de la medida 0-200mm objetivo oscuro	64
Tabla 41. Exactitud de la medida 0-200mm objetivo claro	65
Tabla 42. Exactitud de la medida 0-400mm objetivo oscuro	66
Tabla 43. Exactitud de la medida 0-400mm objetivo claro.	67
Tabla 44. Exactitud de la medida 0-600mm objetivo oscuro	68
Tabla 45. Exactitud de la medida 0-600mm objetivo claro.	69
Tabla 46. Resultados medida estática a 100mm objetivo oscuro.	71
Tabla 47. Resultados medida estática a 100mm objetivo claro.	71
Tabla 48. Resultados medida estática a 190mm objetivo oscuro.	72
Tabla 49. Resultados medida estática a 190mm objetivo claro.	73
Tabla 50. Resultados medida estática a 200mm objetivo oscuro.	74
Tabla 51. Resultados medida estática a 200mm objetivo claro.	75
Tabla 52. Resultados medida estática a 390mm objetivo oscuro.	75
Tabla 53. Resultados medida estática a 390mm objetivo claro.	76
Tabla 54. Resultados medida estática a 300mm objetivo oscuro.	77
Tabla 55. Resultados medida estática a 300mm objetivo claro.	78
Tabla 56. Resultados medida estática a 550mm objetivo oscuro.	79
Tabla 57. Resultados medida estática a 550mm objetivo claro.	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Ejemplo de pieza desarrollada en Solid Works para fijar el sensor láser VL6180X.	3
Ilustración 2. Configuración de pieza en Cura.	4
Ilustración 3. Ventana de debug en Atollic TrueSTUDIO	5
Ilustración 4. Características y microcontroladores soportados por STM32Cube	5
Ilustración 5. Descarga de STM32CubeMX	6
Ilustración 6. Acceso menú instalación complementos	6
Ilustración 7. Selección de la ruta del paquete a instalar	6
Ilustración 8. Selección de la herramienta a instalar	7
Ilustración 9. Acceso a STM32CubeMX	7
Ilustración 10. Creación del nuevo proyecto y del microcontrolador	8
Ilustración 11. Asignación de pines	8
Ilustración 12. Cambio de pines asignados a dispositivo.	9
Ilustración 13. Pestaña de configuración de periféricos	9
Ilustración 14. Pestaña de configuración del reloj de sistema	11
Ilustración 15. Pestaña de generación del proyecto	12
Ilustración 16. Potenciómetro rotativo Murata SV01A con orificio de eje pasante.	16
Ilustración 17. Potenciómetro lineal	16
Ilustración 18. Concepto de montaje con potenciómetro lineal.	17
Ilustración 19. Representación gráfica del concepto de efecto HALL	17
Ilustración 20. Célula de carga analógica	18
Ilustración 21. Principio de funcionamiento de sensor ToF	19
Ilustración 22. Esquema interno del sensor AS5048D	20
Ilustración 23. Esquema de funcionamiento del sensor AS5047D	21
Ilustración 24. Pinout del sensor AS5047D	21
Ilustración 25. Esquema de conexionado para funcionamiento a 3.3v	22
Ilustración 26. Modos de funcionamiento del bus SPI	22
Ilustración 27. Trama de lectura de registro	23
Ilustración 28. Captura de la trama de datos durante la lectura del ángulo	23
Ilustración 29. Conexionado del sensor VL6180X	26
Ilustración 30. Trama de escritura de registro	26
Ilustración 31. Captura de la trama durante proceso de escritura del registro 0x00A3	26

Ilustración 32. Trama de lectura de registro	27
Ilustración 33. Captura de trama de lectura del registro 0x004D	27
Ilustración 34. Pasos para la inicialización del sensor VL6810X	27
Ilustración 35. Diagrama de flujo del proceso de lectura.	30
Ilustración 36. Conexionado del sensor MPU6050	31
Ilustración 37. Trama de escritura de registro	32
Ilustración 38. Captura de la trama de escritura del registro 0x6B	32
Ilustración 39. Trama de lectura de registro	32
Ilustración 40. Captura de la trama de lectura del registro 0x43	32
Ilustración 41. Pasos para la inicialización del sensor MPU6050	33
Ilustración 42. Pinout de la placa Nucleo-L0	35
Ilustración 43. Base giratoria del imán	42
Ilustración 44. Base fija del sensor AS5047D	42
Ilustración 45. Vista frontal del banco de pruebas del AS5047D	42
Ilustración 46. Vista lateral del banco de pruebas del AS5047D	43
Ilustración 47. Vista general del banco de pruebas del AS5047D	43
Ilustración 48. Vista lateral del banco de pruebas del VL6180X	45
Ilustración 49. Vista frontal del banco de pruebas del VL6180X	45
Ilustración 50. Objetivo oscuro no reflectante frente al sensor V6180X	46
Ilustración 51. Medida estática 180° sin interferencia a 2mm	48
Ilustración 52. Medida estática 180° sin interferencia a 2mm descentrado	48
Ilustración 53. Medida estática 180° sin interferencia a 4mm	49
Ilustración 54. Medida estática 180° sin interferencia a 4mm descentrado.	50
Ilustración 55. Medida estática 180° con interferencia a 2mm	51
Ilustración 56. Medida estática 180° con interferencia a 2mm descentrado	51
Ilustración 57. Medida estática 180° con interferencia a 4mm	52
Ilustración 58. Medida estática 180° con interferencia a 4mm descentrado	53
Ilustración 59. Medidas 0 a 360 imán a 2mm centrado	54
Ilustración 60. Medidas 0 a 360 imán descentrado	55
Ilustración 61. Medidas 0 a 360 imán a 4mm centrado	56
Ilustración 62. Medidas 0 a 360 imán a 4mm descentrado	57
Ilustración 63. Comportamiento dinámico con imán a 2mm	58
Ilustración 64. Comportamiento dinámico con imán a 2mm descentrado	58
Ilustración 65. Comportamiento dinámico con imán a 4mm	59
Ilustración 66. Comportamiento dinámico con imán a 4mm descentrado	59
Ilustración 67. Límites de medida para rango 0-200mm objetivo oscuro.	60
Ilustración 68. Límites de medida para rango 0-200mm objetivo claro.	61
Ilustración 69. Límites de medida para rango 0-400mm objetivo oscuro.	61
Ilustración 70. Límites de medida para rango 0-400mm objetivo claro.	62

Ilustración 71. Límites de medida para rango 0-600mm objetivo oscuro.	62
Ilustración 72. Límites de medida para rango 0-600mm objetivo claro.	63
Ilustración 73. Exactitud de la medida 0-200mm objetivo oscuro	64
Ilustración 74. Exactitud de la medida 0-200mm objetivo claro.	65
Ilustración 75. Exactitud de la medida 0-400mm objetivo oscuro.	66
Ilustración 76. Exactitud de la medida 0-400mm objetivo claro.	67
Ilustración 77. Exactitud de la medida 0-600mm objetivo oscuro	68
Ilustración 78. Exactitud de la medida 0-600mm objetivo claro.	69
Ilustración 79. Medida estática a 100mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo oscuro.	70
Ilustración 80. Medida estática a 100mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo claro.	71
Ilustración 81. Medida estática a 190mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo oscuro.	72
Ilustración 82. Medida estática a 190mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo claro.	73
Ilustración 83. Medida estática a 200mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo oscuro.	74
Ilustración 84. Medida estática a 200mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo claro.	74
Ilustración 85. Medida estática a 390mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo oscuro.	75
Ilustración 86. Medida estática a 390mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo claro.	76
Ilustración 87. Medida estática a 300mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo oscuro.	77
Ilustración 88. Medida estática a 300mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo claro.	78
Ilustración 89. Medida estática a 550mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo oscuro.	79
Ilustración 90. Medida estática a 550mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo claro.	80

Notación

CLK	Clock
DSP	Digital Signal Processor
HAL	Hardware Abstraction Layer
I2C	Inter-Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
LSB	Less Significant Bit
MEMS	Microelectromechanical System
MISO	Master Input Slave Output
MOSI	Master Output Slave Input
MSB	Most Significant Bit
PLL	Phase Lock Loop
PWM	Pulse Width Modulation
SCL	Serial Clock
SDA	Serial Data
SPI	Serial Peripheral Interface
SS	Slave Select
ToF	Time of Flight
UART	Universal Asynchronous Receiver-transmitter
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser

1 INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) han sido utilizados desde su aparición, principalmente en el entorno militar, para tareas de vigilancia, exploración o ataque. Inicialmente los elevados costes de estos aparatos impedían su uso en el ámbito civil, sin embargo, los constantes avances en materia de electrónica han reducido enormemente los costes, dando lugar a diversas aplicaciones de fotografía, seguridad y vigilancia, o transporte de carga ligera. En los últimos años, el desarrollo tecnológico y el esfuerzo de varios grupos de investigación han hecho posible que estos aparatos realicen tareas que impliquen contacto físico y actuación con el entorno, como puede ser la instalación y recogida de sensores en áreas contaminadas, la reparación de palas de aerogeneradores afectadas por corrosión, o el aislamiento de fugas en tuberías en la industria química. La manipulación aérea es un campo de investigación reciente en robótica que propone la integración de uno o varios brazos robóticos en plataformas aéreas autónomas, típicamente de tipo quadrotor o hexarotor. Algunas de las posibilidades que ofrece esta tecnología han sido tratadas en trabajos recientes [1][2][3]. El uso de manipuladores aéreos abre una gama de aplicaciones como la manipulación de objetos, la inspección y el mantenimiento de entornos industriales, la construcción de estructuras, la toma de muestras de material de zonas de difícil acceso u otras aplicaciones en exteriores [4]. Se espera que, en un futuro, esta tecnología alcance un grado de madurez tal que permita reemplazar a los trabajadores humanos en tareas de alta peligrosidad y difícil acceso, reduciendo así riesgos y costes.

1.1 Antecedentes

El presente trabajo de fin de máster se realiza en el contexto del proyecto H2020 AEROARMS, coordinado por el Grupo de Robótica Control y Visión de la Universidad de Sevilla y en el cuál colaboran diez grupos o centros de investigación europeos, así como otras empresas del ámbito de la inspección. Dicho proyecto tiene como objetivo la integración de brazos robóticos de bajo peso en vehículos aéreos no tripulados para su aplicación a tareas de inspección y mantenimiento en entornos industriales. Se pretende dotar a estos sistemas de capacidades de manipulación, percepción, navegación o planificación en entornos complejos, lo que involucra el desarrollo de prototipos y métodos de control específicos realizados por un equipo multidisciplinar.

1.2 Uso de articulaciones flexibles. *Compliance*

En robótica, el término *compliance* hace referencia a flexibilidad o capacidad de acomodación a fuerzas. En este contexto, la flexibilidad o *compliance*, puede definirse como la permisión de desviaciones en la articulación con respecto a la posición de equilibrio ante la aplicación de fuerzas externas, siendo la posición de equilibrio aquella en la que el actuador genera un torque o fuerza igual a cero.

Un robot cuyas articulaciones sean rígidas tratará de alcanzar una posición de referencia o bien de seguir una trayectoria sin importar que existan fuerzas externas, por ejemplo, debido a contacto o impactos. Sin embargo, los robots *compliant*, permiten detectar colisiones y actuar en consecuencia [5], estimar el torque de las articulaciones, así como controlar el esfuerzo en el extremo del brazo [6]. De este modo, un robot con articulaciones flexibles será capaz de sujetar un objeto delicado sin llegar a romperlo, ya que puede aplicar la fuerza necesaria para sujetarlo sin dañarlo. La detección y reacción a colisiones es una característica interesante ya que evita daños tanto al propio brazo como al entorno de trabajo.

La utilización de articulaciones flexibles es una característica muy deseable en brazos robóticos motivada por razones de seguridad y eficiencia [7][8]. En el caso de manipulación aérea, impide que las fuerzas de contacto se propaguen rígidamente hasta el de la base del UAV [9], mejora la protección de los actuadores contra choques e impactos, e incrementa el tiempo de reacción de la plataforma, reduciendo así el riesgo de comportamiento inestable. Esta última característica es especialmente útil cuando hay restricciones de movimiento asociadas a operaciones de contacto o *grasping*.

Para lograr que un brazo robótico sea flexible, pueden introducirse elementos elásticos entre el actuador o

bien en el enlace de salida [5], típicamente muelles o elastómeros, de forma similar a la elasticidad natural de los tendones y músculos en el cuerpo humano. Estos elementos elásticos son capaces de almacenar energía potencial en presencia de cargas o colisiones, siendo liberada de forma brusca cuando estas desaparecen, dando lugar a comportamientos no deseados que pueden llegar a ser peligrosos para el entorno y la propia estructura del brazo. Esta situación puede evitarse controlando activamente la tensión del elemento elástico, reduciendo así la energía almacenada o liberándola de manera controlada. Esto requiere sensores que permitan medir los esfuerzos a los que están sometidos los eslabones implicados, o bien la deformación provocada.

1.3 Objetivos del proyecto

Los brazos actualmente en uso han sido desarrollados haciendo uso de componentes comercialmente disponibles [6] [10]. Emplea como actuadores los así llamados servos inteligentes (“Smart servos”) Herkulex DRS-0201 para las articulaciones del hombro y Herkulex DRS-0101 para las restantes. Estos servos ofrecen una buena relación torque/peso que los hace adecuados para aplicaciones de manipulación aérea. Además, permiten la lectura de ciertas señales tales como la posición, velocidad, o el PWM aplicado al motor, relacionado con el torque. Sin embargo, la baja resolución y sensibilidad de esta señal, así como su baja frecuencia de muestreo, no permiten su utilización en un esquema de control, por lo que se debe recurrir a sensores externos para estimar el par a través de la deflexión articular. La solución implementada actualmente utiliza potenciómetros comerciales Murata SV01A en las articulaciones para medir la diferencia de ángulo entre el actuador y el enlace de salida en cada una de las articulaciones. Esta forma de medir la deflexión requiere de contacto físico entre las distintas piezas, lo cual acarrea desgastes, esfuerzos innecesarios, errores de medida, así como zonas muertas cuando hay holguras o excentricidades superiores a 1mm. Esto afecta de forma significativa al sistema de control, llevando a comportamientos no deseados.

El presente trabajo de fin de máster tiene como objetivo identificar posibles mejoras a la solución implementada actualmente para la medida de deflexión de las articulaciones de los brazos robóticos integrados en la plataforma aérea. Se propondrán alternativas o mejoras, evaluando las mismas de forma experimental mediante una batería de pruebas especialmente diseñada para estudiar los requisitos que debe cumplir dicha solución. Para ello se proponen los siguientes objetivos:

- 1) Evaluación preliminar de sensores
- 2) Desarrollo hardware/software de equipo de pruebas
- 3) Evaluación experimental
- 4) Análisis de resultados

1.4 Estructura del documento

El resto del documento se organiza de la siguiente forma. El Capítulo 2 describe las herramientas software utilizadas en los procesos de diseño de piezas 3D y firmware del microcontrolador. En el Capítulo 3 se plantearán posibles implementaciones para medir la deflexión articular y se seleccionarán las más adecuadas, que serán sometidas a las distintas pruebas. También se describirá el conexionado de los sensores, su configuración y su funcionamiento. El Capítulo 4 detalla todo lo referente al firmware del microcontrolador, desde la configuración de los distintos periféricos hasta las librerías desarrolladas para la integración de los dispositivos de medida. El Capítulo 5 describe el setup de pruebas al que se someterá cada sensor con el objetivo de obtener de manera experimental sus características, presentando en el Capítulo 6 los resultados, proponiendo aquí la solución final. Por último, en el Capítulo 7 se hablará sobre futuros trabajos relacionados con el desarrollo aquí expuesto.

2 SOFTWARE DE DESARROLLO

En la realización de este trabajo, han sido necesarias varias herramientas de software que han permitido tanto desarrollar las librerías y programas del microcontrolador para acceder a los sensores, como diseñar en 3D piezas para la integración de los circuitos en el equipo final y elementos de apoyo para el banco de pruebas.

A continuación, se describirán las distintas herramientas utilizadas, haciendo especial hincapié en la plataforma de desarrollo software empleada en la programación del microcontrolador, que será usada para desarrollos futuros del proyecto por su facilidad de uso, versatilidad y amplia funcionalidad.

2.1 SolidWorks

SolidWORKS es una herramienta de diseño 3D que permite, gracias a su intuitiva interfaz gráfica, desarrollar rápidamente piezas, ensamblajes y dibujos en 2D. Incluye multitud de funcionalidades como el análisis de tensión en piezas, costes de fabricación, simulación de fuerzas y movimientos, entre otras.

El proceso de diseño consiste, en primer lugar, en la toma de medidas de todos los elementos que se encajarán en nuestra pieza, así como de la zona sobre la que irá colocada la misma. Una vez conocidas todas las dimensiones, se procede a dibujar sobre el plano las vistas de la figura. A continuación, se extruyen las formas dibujadas y, si fuese necesario, se vacían los volúmenes generados. Finalmente, se aplican a la pieza los ajustes finales, tales como redondeos y refuerzos.

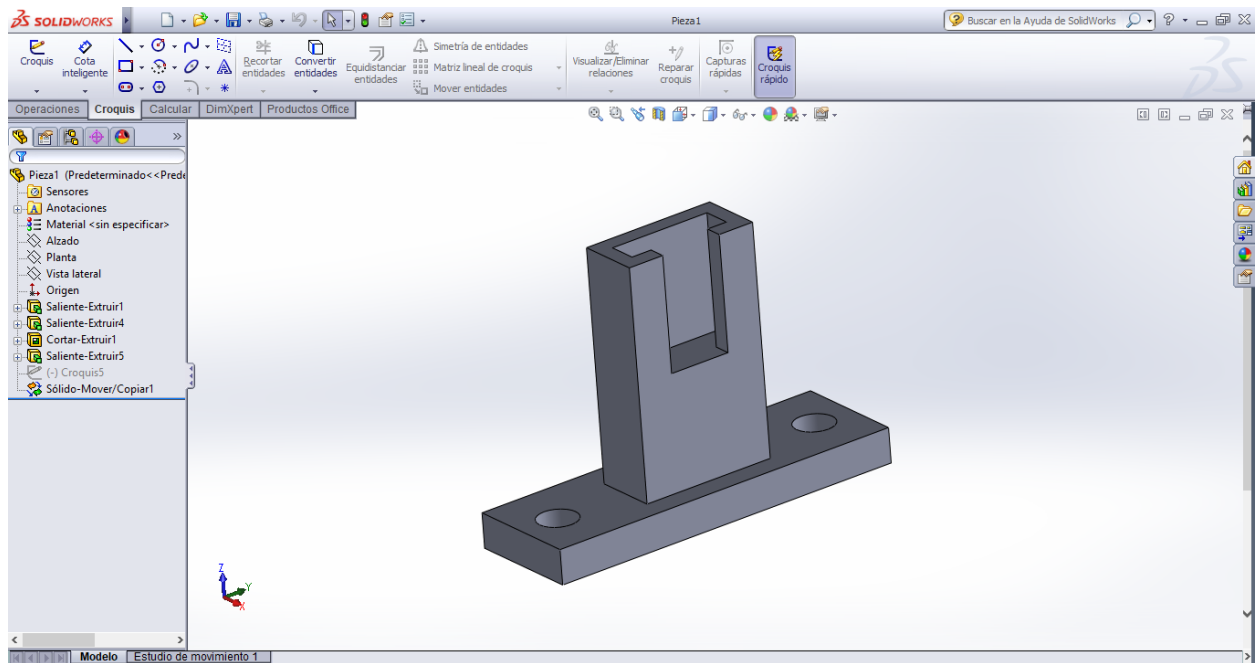


Ilustración 1. Ejemplo de pieza desarrollada en Solid Works para fijar el sensor láser VL6180X.

Durante el desarrollo del trabajo, este software ha sido empleado para diseñar el elemento de sujeción del sensor de tiempo de vuelo VL6180X en el banco de pruebas, así como las demás piezas que permiten la integración de los sensores en los brazos ya existentes. El programa permite exportar las piezas diseñadas a un archivo de extensión STL. Estos ficheros contienen la información relativa a la geometría del objeto. Utiliza una malla de triángulos cerrada para definir la forma del objeto diseñado en la aplicación CAD. Cada pieza diseñada podrá imprimirse en 3D gracias a la exportación a este tipo de archivo.

El archivo STL generado debe introducirse en otro software, descrito en el próximo apartado, que genera un archivo legible por el *firmware* la impresora.

2.2 Ultimaker Cura

El Ultimaker Cura es el software encargado de traducir el archivo .STL generado por el software de diseño 3D a otro de extensión .GCODE. Éste es el nombre del lenguaje de descripción de operaciones para máquinas de control numérico por ordenador, indicando los desplazamientos del cabezal de la impresora. Cura se encarga de generar las diferentes trayectorias de dicho cabezal basándose en la geometría de la pieza a imprimir, así como en la configuración de impresión indicada por el usuario.

Cura permite modificar parámetros como la calidad de impresión, relleno de la pieza, inclusión de estructuras de soporte, etc, con el fin de que la impresión tome menos tiempo o por el contrario obtener un acabado mas preciso.

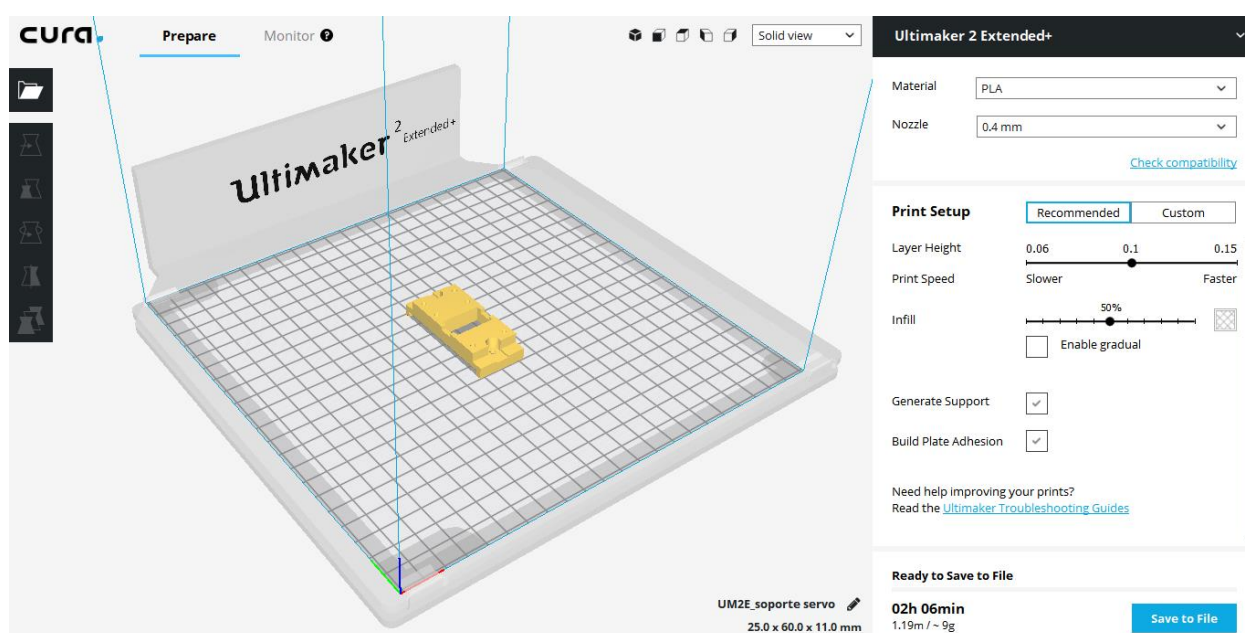


Ilustración 2. Configuración de pieza en Cura.

2.3 Atollic TrueSTUDIO Lite

Es un entorno de desarrollo integrado (IDE) que permite programar en C/C++ y *debuggear* programas para microcontroladores basados en ARM Cortex-M, tales como la serie STM32L0 empleada en este trabajo. Incluye multitud de ejemplos que ayudan a familiarizarse con la plataforma, código para placas de desarrollo específicas y videotutoriales oficiales con los que el ahorro de tiempo durante las primeras sesiones de uso es considerable. Mediante su ventana de *debug*, es posible localizar errores y seguir la ejecución de nuestro Código de manera sencilla y precisa, así como acceder a cada una de las variables y registros del microcontrolador en tiempo real. Además de proporcionar potentes herramientas que facilitan en gran medida la labor del desarrollador, permite integrar módulos de terceros que añaden funcionalidades no incluidas en el programa original. Permite usar el programador oficial de ST Microelectronics para cargar y *debuggear* la aplicación.

Este software es gratuito en su versión Lite, no requiriendo pago ni registro para ser utilizado. Desde el pasado 18 de enero de 2018 está disponible sin coste alguno la versión completa del software para dispositivos de ST Microelectronics, requiriendo únicamente registrarse en la web del fabricante.

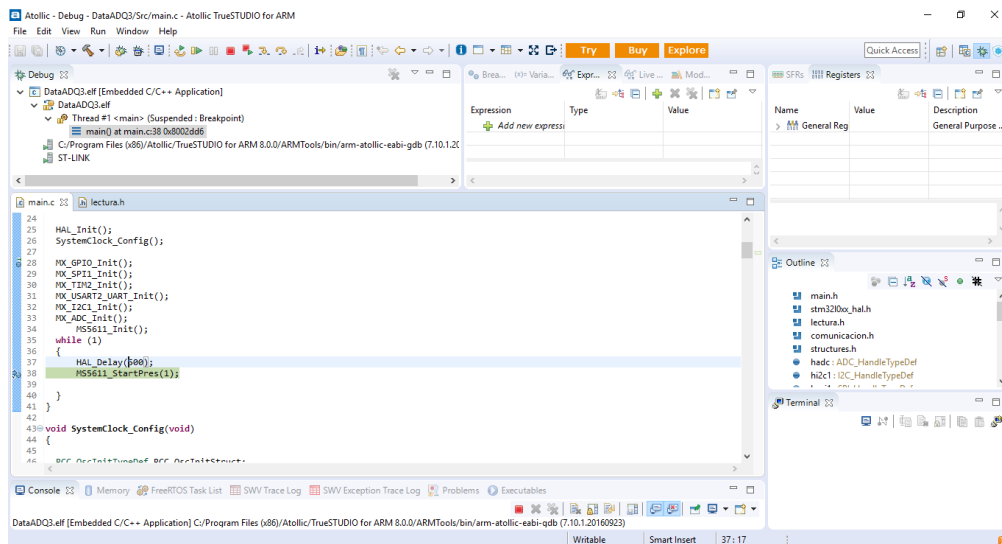


Ilustración 3. Ventana de debug en Atollic TrueSTUDIO

2.3.1 STM32CubeMX.

STM32Cube es una herramienta desarrollada por ST Microelectronics destinada a reducir el esfuerzo inicial que los programadores dedican a inicializar los periféricos, el reloj y, en general, la configuración inicial del microcontrolador. Además, proporciona información sobre errores de configuración e incompatibilidades entre periféricos, pines u opciones de configuración. Permite seleccionar cualquier microcontrolador de la familia STM32, configurarlo, generar el código de inicio y crear el proyecto para nuestro IDE mediante una interfaz gráfica muy intuitiva.

La librería HAL (Hardware Abstraction Layer) permite acceder a lo periféricos del microcontrolador mediante llamadas a sencillos métodos. Esta librería facilita significativamente la capacidad de portabilidad entre los diferentes microcontroladores del fabricante, lo que no sería posible usando librerías de bajo nivel o trabajando a nivel de registro.

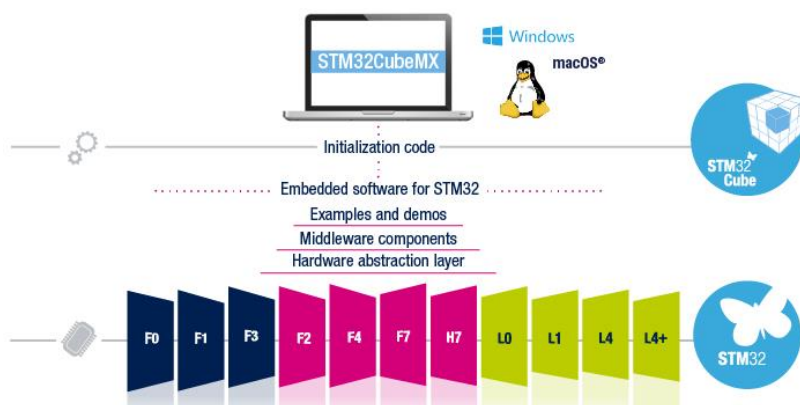


Ilustración 4. Características y microcontroladores soportados por STM32Cube

Atollic TrueSTUDIO Lite permite integrar esta aplicación en el propio IDE. De esta forma es posible generar la inicialización del microcontrolador e importar el proyecto de forma automática y sin tener que ejecutar otras aplicaciones. A continuación, se detallan los pasos a seguir:

- 1) El primer paso para incluir la herramienta es descargar desde la web de ST Microelectronics el archivo que contiene el instalador, dicho archivo se denomina *STSW-STM32095*, el cual puede ser encontrado fácilmente en la web oficial usando el buscador.

TOOLS AND SOFTWARE

Development Tools			
SOFTWARE DEVELOPMENT TOOLS			
Part Number	Manufacturer	Description	Action
STSW-STM32095	ST	STM32CubeMX Eclipse plug in for STM32 configuration and initialization C code generation	Download

Ilustración 5. Descarga de STM32CubeMX

- 2) Una vez descargado el archivo con extensión .ZIP, será necesario abrir el Atollic TrueSTUDIO y dirigirse al menú *HELP* localizado en la barra de herramientas y seleccionar la opción *INSTALL NEW SOFTWARE*.

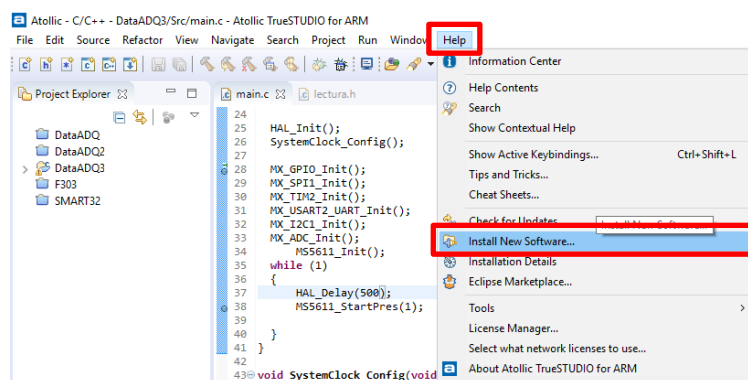


Ilustración 6. Acceso menú instalación complementos

- 3) Aparecerá una nueva ventana, en la que deberemos pulsar sobre *ADD*. Después de esto, otra ventana se abrirá, en la que se deberá indicar la ruta del archivo, pudiendo escribirla manualmente o abriendo el explorador pulsando el botón *ARCHIVE*.

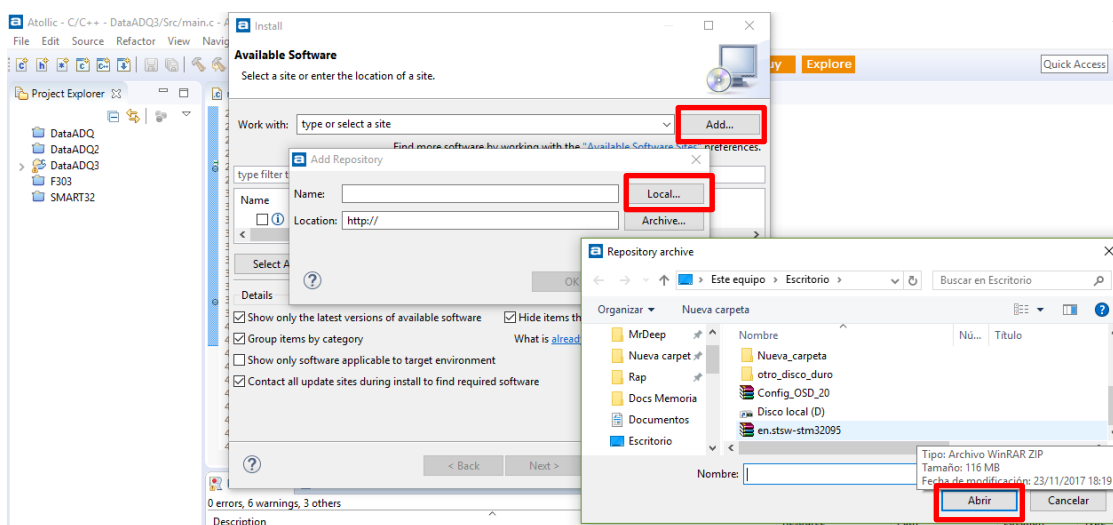


Ilustración 7. Selección de la ruta del paquete a instalar

- 4) Por último, el programa mostrará los paquetes disponibles para instalar el archivo *.ZIP*. Seleccionamos el paquete de STM32CubeMX y finalizamos haciendo clic sobre *NEXT*

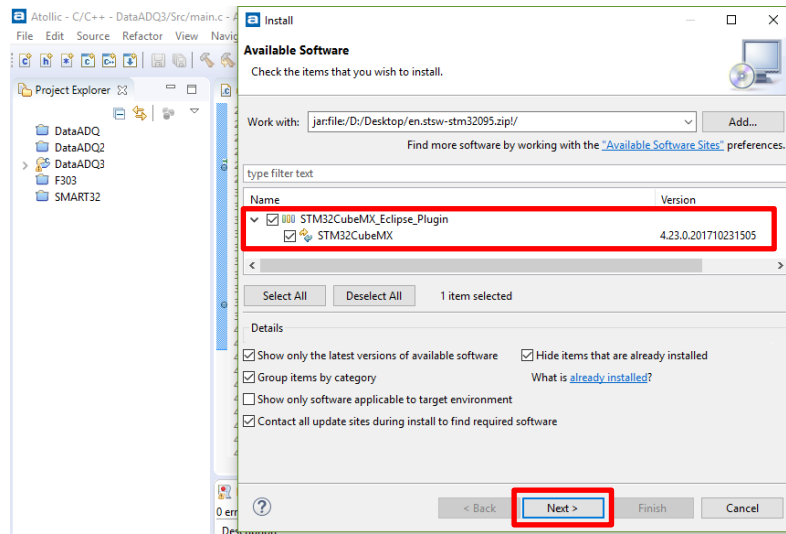


Ilustración 8. Selección de la herramienta a instalar

2.3.2 Creación del proyecto

El primer paso será iniciar la aplicación normalmente. Una vez haya arrancado, será necesario ejecutar el módulo de STM32CubeMX, para lo que se deberá cambiar de perspectiva desplegando el menú *VIEW*, accediendo a la pestaña de *OPEN PERSPECTIVE* y finalmente *OTHERS*. Una vez llegados aquí, aparecerá la opción de ejecutar el módulo mencionado.

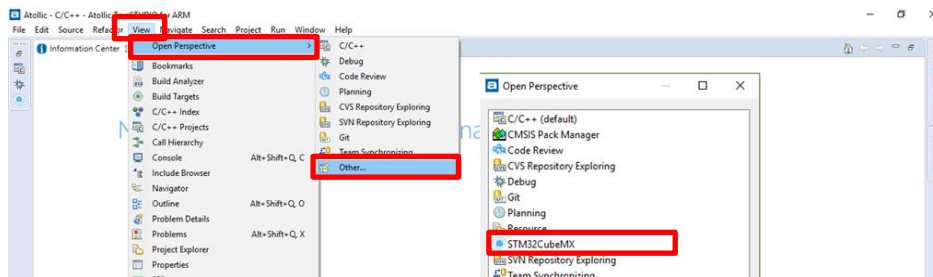


Ilustración 9. Acceso a STM32CubeMX

Cuando se haya iniciado la aplicación, será necesario pulsar sobre *NEW PROJECT*, de este modo aparecerá una nueva ventana en la que se deberá elegir el microcontrolador en el que se basa nuestro circuito. Para facilitar la búsqueda, la aplicación permite filtrar los resultados por encapsulado, periféricos del microcontrolador, velocidad de reloj, memoria, etc. También puede buscarse en la lista completa del fabricante o introduciendo la referencia de nuestro dispositivo en el buscador.

El filtrado por número de periféricos es especialmente útil cuando se desea buscar un microcontrolador que satisfaga los requisitos el proyecto.

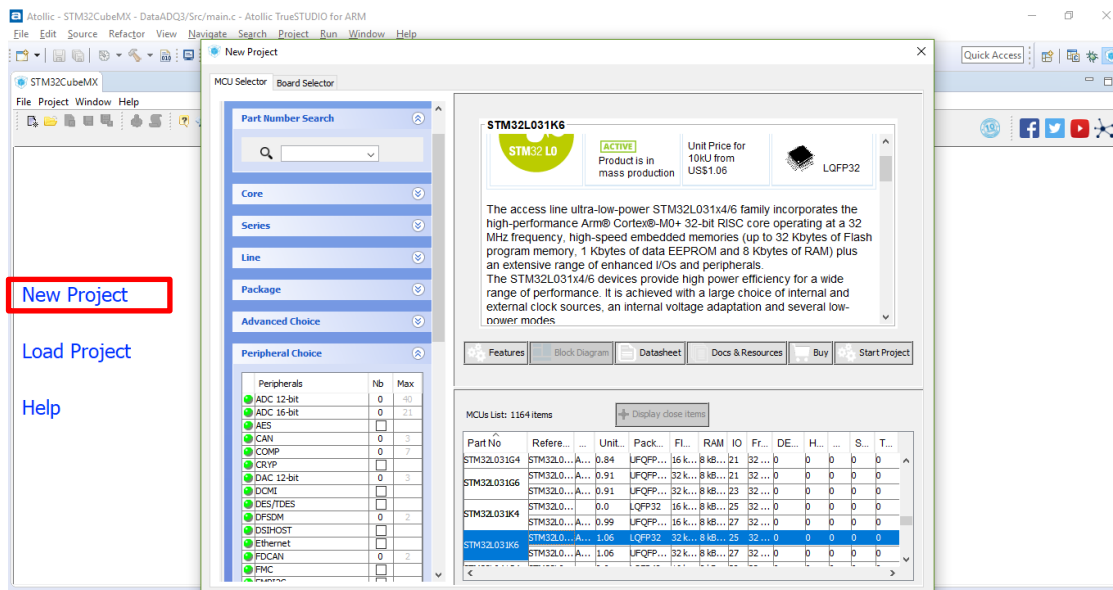
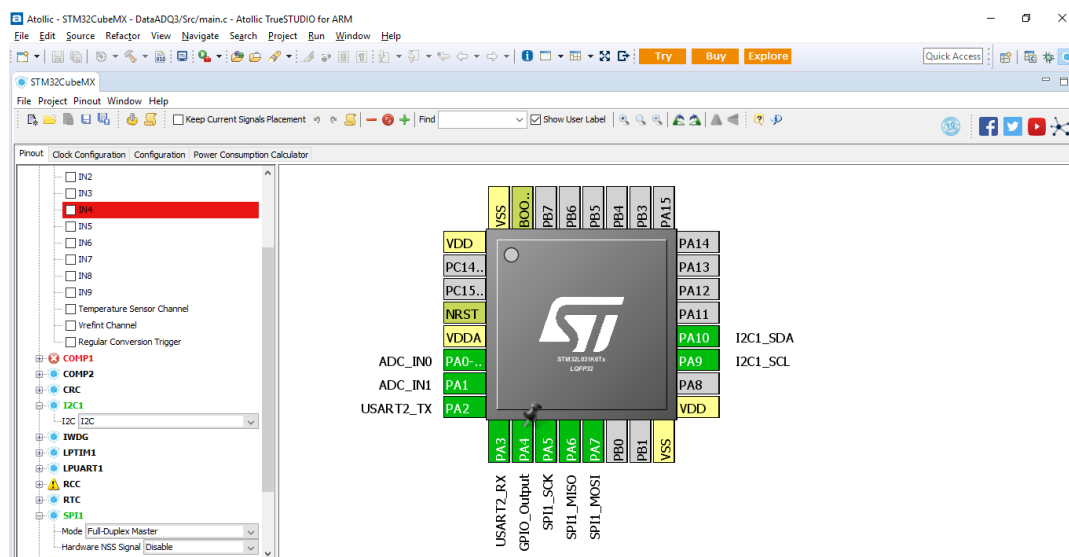


Ilustración 10. Creación del nuevo proyecto y del microcontrolador

El microcontrolador utilizado en este trabajo es el STM32L031K6T6, que será descrito en el siguiente capítulo. Una vez seleccionado, somos redirigidos a la ventana principal de la aplicación, donde se muestra a la izquierda un menú con los distintos periféricos del dispositivo, en el centro, aparecerá el *pinout*, donde podremos observar los pines usados y, en caso de ser necesario, reasignar cada periférico a un conjunto distinto de pines alternativo al asignado por defecto.

Para activar un periférico solo debemos desplegar el menú correspondiente y realizar su activación y, en algunos casos, una configuración básica. A medida que activamos los distintos elementos, se actualizará la imagen central, para mostrarnos los pines que corresponden por defecto a la función seleccionada. Del mismo modo, en el menú de periféricos irán apareciendo avisos que nos indicarán funciones no disponibles tras la activación por motivos de compartición de recursos (Timers, pines, etc.).



funcionamiento. Para ello basta con desplazarse con el ratón sobre el pin que se desea cambiar y pulsar la tecla *CTRL* y clic izquierdo, de este modo apareará el pin alternativo sombreado. Para realizar el cambio basta con arrastrar el pin hasta el alternativo manteniendo pulsada la tecla *CTRL*.

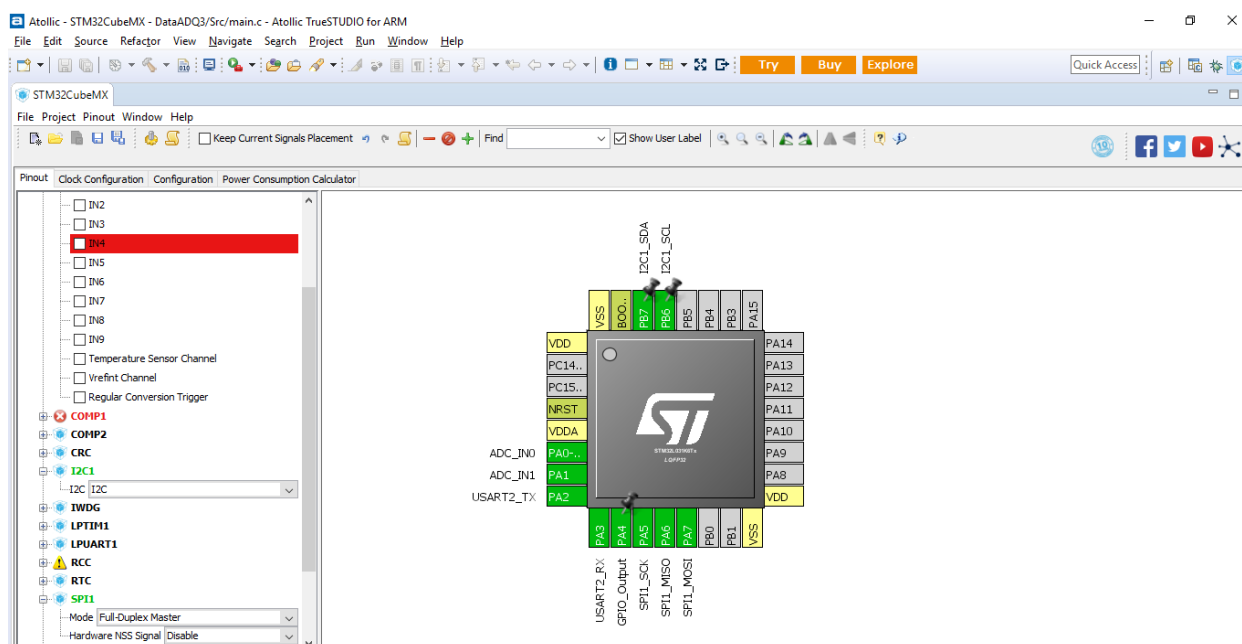


Ilustración 12. Cambio de pines asignados a dispositivo.

Una vez activados los periféricos necesarios para conectar los sensores, es necesario configurarlos. Para ello es necesario acceder a la pestaña *CONFIGURATION*. A la derecha aparecerá un menú con los periféricos activos y en la pantalla central los botones de acceso a los menús de configuración de cada uno.

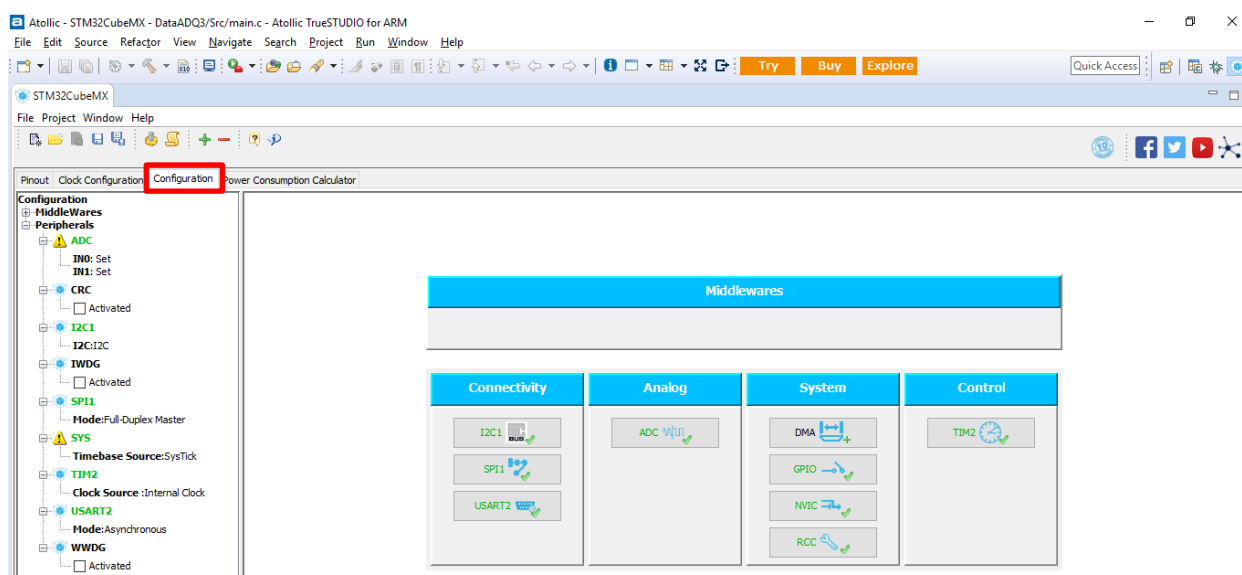


Ilustración 13. Pestaña de configuración de periféricos

A modo de resumen, en las Tablas 1,2 y 3 se muestran las distintas opciones de configuración seguidas para cada periférico.

Tabla 1. Configuración bus I²C.

Controlador I²C	
I²C Speed Mode	Fast Mode
I²C Speed Frequency (KHz)	400
Rise Time (ns)	0
Fall Time (ns)	0
Coefficient of Digital Filter	0
Analog Filter	Enabled
Timing	0x00300F38

Tabla 2. Configuración bus SPI.

Controlador SPI	
Frame Format	Motorola
Data Size	16 Bits
First Bit	MSB First
Prescaler (for Baud Rate)	32
Baud Rate	1000 KBits/s
Clock Polarity (CPOL)	Low
Clock Phase (CPHA)	2 Edge
CRC Calculation	Disabled
NSS Signal Type	Software

Tabla 3. Configuración UART.

Controlador UART	
Baud Rate	115200 Bits/s
Word Lengh	8 Bits (including Parity)
Parity	None
Stop Bits	1
Data Direction	Receive and Transmit
Over Sampling	16 Samples
Single Sample	Disable

Finalmente, es necesario configurar el reloj del sistema y los periféricos. Para ello, nos dirigimos a la pestaña *CLOCK CONFIGURATION*. Tras esto, aparecerá una ventana en la que se muestra un esquema del reloj del sistema y los dispositivos en los que aparecen varios parámetros configurables, tales como multiplicadores y divisores de frecuencia, fuentes de reloj, etc. Mediante el ajuste de estas opciones debemos lograr la frecuencia del núcleo y los periféricos adecuada a nuestras necesidades de potencia y consumo. En caso de no llegar a la frecuencia mínima de algún periférico, o superar la máxima permitida, el elemento que falla se sombreadrá en rojo y nos indicará el rango correcto de funcionamiento. Mientras exista un error en algún periférico nos será imposible avanzar.

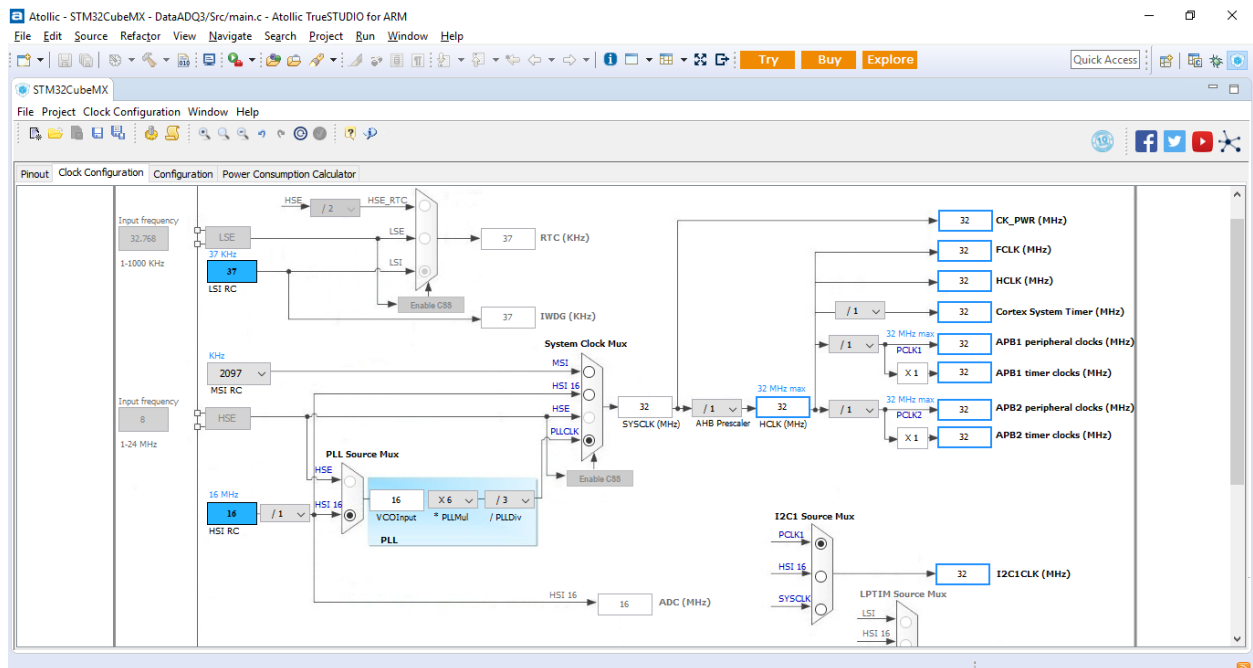


Ilustración 14. Pestaña de configuración del reloj de sistema

En nuestro caso, se ha usado como fuente de reloj el oscilador interno del microcontrolador y se ha empleado el PLL para aumentar la frecuencia de funcionamiento desde los 16 MHz hasta los 32 MHz, la máxima permitida. Como resumen, a continuación, en la tabla 4, se muestran las opciones de configuración para el reloj.

Tabla 4. Configuración reloj de sistema.

Reloj del sistema	
System Clock Mux	PLL
HSI RC Div	1
PLL Mult	6
PLL Div	3
Cortex System Timer Div	1
APB1 Peripheral Clock Div	1
PCLK1	1
PCLK2	1
AHB Prescaler	1
I ² C Source Mux	PCLK1
USART2 Source Mux	PCLK1

Hay que tener en cuenta que cualquier cambio en las frecuencias de periféricos modificará los *baudrates* y otros aspectos que dependan del reloj. Una vez ajustado y revisado todo, procederemos a generar el código fuente y el proyecto para poder usarlo en nuestro IDE junto con las librerías HAL. Para ello se accede al menú de opciones y pulsamos sobre *GENERATE SOURCE CODE*. Aparecerá una ventana que permitirá elegir el nombre del proyecto, su ubicación y el IDE.

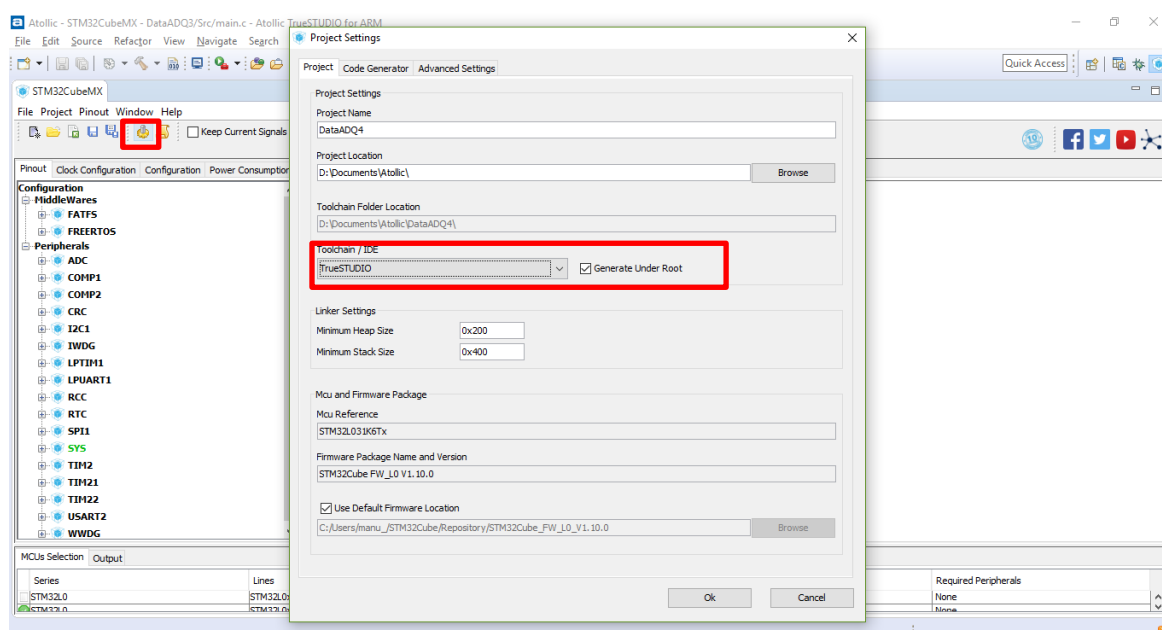


Ilustración 15. Pestaña de generación del proyecto

Esto finaliza la operación, generará un proyecto que incluye las librerías HAL y un archivo *main.c* en el que se incluyen los métodos de configuración de los periféricos.

3 HARDWARE Y SENSORES

Dado que el manipulador robótico está acoplado a un vehículo aéreo multirrotor, el peso es un factor muy importante del que depende, no solo el tiempo de vuelo, sino la estabilidad y la maniobrabilidad de la plataforma. Es por ello que debe reducirse al mínimo cada incremento de masa en el conjunto asociado al mecanismo de medida de deflexión.

La interferencia electromagnética generada por los motores y sus controladores hace necesario sensores inmunes o bien disponer de circuitos de filtrado que aseguren una adecuada relación señal-ruido y una medida fiable, independientemente de las condiciones de operación.

También hay que tener en cuenta las herramientas disponibles para la fabricación, que no permiten obtener la máxima precisión posible, siendo necesaria cierta tolerancia dimensional.

Dicho esto, es deseable que el sistema electrónico para la medida de deflexión cumpla los siguientes requisitos:

- Bajo peso (inferior a 20 gramos)
- Compacto, que permita su fácil integración sin tener que llevar a cabo modificaciones importantes en la estructura mecánica ya existente
- Que sea de fácil integración en las articulaciones.
- Que no exista acoplamiento mecánico entre el sensor y el actuador, o bien dicho que acoplamiento permita cierta tolerancia o excentricidad.
- Que no implique cableado excesivo, si no que el conjunto de sensores pueda conectarse a un único bus de datos.

3.1 Posibles soluciones

A continuación, se describen posibles soluciones al problema y se describirán sus ventajas e inconvenientes.

3.1.1 Sensores con contacto físico

Este tipo de sensor implica contacto físico entre el actuador (eje del servo) y el enlace de salida del manipulador. Las ventajas principales de esta solución son la sencillez y coste. Por otro lado, generalmente presenta problemas de desgaste y necesita alineación precisa para eliminar esfuerzos innecesarios.

3.1.1.1 Potenciómetro rotativo

Acoplando un potenciómetro rotatorio a la articulación, es posible obtener una tensión de salida proporcional al ángulo de deflexión entre actuador y brazo.

Esta solución presenta algunos inconvenientes:

- Desgaste del potenciómetro. Los potenciómetros se desgastan al someterse a un uso continuado en el tiempo, produciendo medidas falsas y ruido.
- Alineación. Es necesario que el eje de giro del potenciómetro este correctamente alineado (permite cierta tolerancia) con el eje de la articulación para evitar sobre esfuerzos que dañen el sensor.
- Amplitud de la tensión de salida. Debido a que el giro del potenciómetro será de un ángulo relativamente pequeño, la tensión de salida en el terminal del potenciómetro variará muy poco, haciéndola más sensible al ruido.
- Necesidad de varios cables para cada sensor. No es posible acoplar todos los sensores a un bus de datos y leer todos ellos usando la menor cantidad de cables posible.

- Sensible al ruido eléctrico. El sistema eléctrico que propulsa los multicopteros consume mucha corriente, además, al ser los controladores de los motores inversores de corriente se producen importantes picos de corriente, esto puede introducir ruido en los terminales del potenciómetro.
- Para solucionar los problemas de amplitud y ruido, es necesario desarrollar una etapa de amplificación y filtrado, lo que complica el diseño e incrementa el número de componentes, aumentando, por ende, el peso y el espacio necesario.

Esta es la solución implementada actualmente en los prototipos mencionados en la introducción. Los problemas de nivel de salida y el ruido pueden solucionarse mediante un filtro paso bajo y un amplificador, que elimina las fluctuaciones de tensión debidas al ruido eléctrico que generan el multicoptero, así como los efectos de las vibraciones en el conjunto sensor/articulación que también produce pequeñas variaciones de tensión. Sin embargo, esto complica el diseño e incrementa el número de componentes, aumentando, por ende, el peso y el espacio necesario.

En la ilustración 16 se muestra el potenciómetro Murata SV01A utilizado en la solución actual.



Ilustración 16. Potenciómetro rotativo Murata SV01A con orificio de eje pasante.

3.1.1.2 Potenciómetro lineal.

Este tipo de potenciómetros se diferencia del anterior en el movimiento que produce la variación de la tensión de salida, en este caso, un desplazamiento lineal. Este tipo de sensor puede emplearse para medir la compresión de uno de los muelles de la articulación, de esta forma la alineación no es un factor tan crítico como en el caso anterior. Conocida la compresión del muelle, puede calcularse el ángulo de giro y el torque. En la ilustración 18

Esta solución presenta los mismos problemas que la anterior, con la salvedad de la necesidad de alineación. Sin embargo, este tipo de potenciómetros es más voluminoso y pesado. En la ilustración 17 se presenta este tipo de potenciómetro. La figura 18 muestra un montaje conceptual de su integración.



Ilustración 17. Potenciómetro lineal

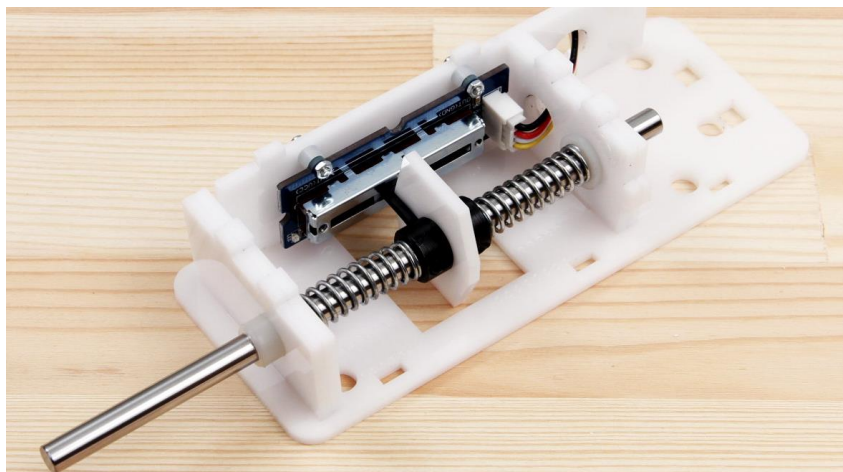


Ilustración 18. Concepto de montaje con potenciómetro lineal.

3.1.1.3 Potenciómetros de efecto hall.

Se trata de un tipo de sensor similar al anterior, sin embargo, en este caso, la tensión de salida no es generada por el desplazamiento de un cursor sobre una pista de material resistivo, sino por el efecto Hall.

El efecto Hall consiste en la aparición de un campo eléctrico en un conductor cuando es atravesado por un campo magnético. Cuando por un material conductor o semiconductor, circula una corriente eléctrica, y estando este mismo material en el seno de un campo magnético, los portadores de carga se desvían y agrupan a un lado del material conductor o semiconductor, apareciendo así un campo eléctrico perpendicular al campo magnético y a la corriente que circula por el material. Este campo eléctrico es el denominado campo Hall, y ligado a él aparece la tensión Hall. La intensidad del campo magnético que atraviesa el conductor influye directamente en la tensión generada. En la ilustración 19 se muestra una representación de dicho efecto.

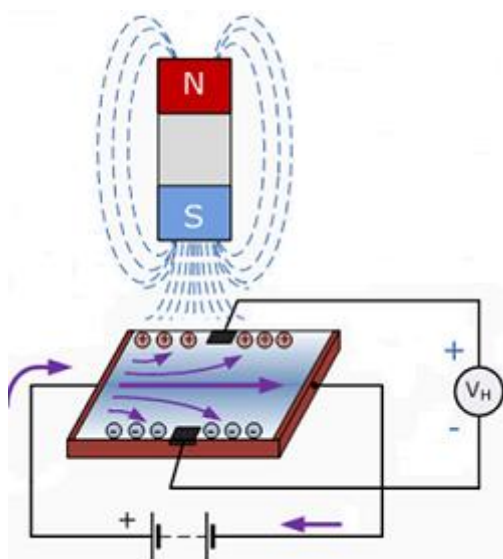


Ilustración 19. Representación gráfica del concepto de efecto HALL

Dado que el elemento que hace variar la tensión no es un cursor sobre una pista de material resistivo, sino el campo magnético proveniente de un imán no existe contacto físico entre los elementos del sensor. Esto soluciona el problema del desgaste en los dos sensores anteriores, manteniendo los otros mencionados.

3.1.1.4 Células de carga.

Las células de carga pueden emplearse para medir la fuerza que están ejerciendo los muelles sobre la superficie en la que se apoyan, de este modo, conociendo la constante elástica del muelle, es posible conocer la longitud que se han comprimido y el par que está soportando la articulación. Además, es posible encontrar en el mercado células de carga pensadas para medir esfuerzos muy pequeños, e incluso células digitales, con lo que es posible comunicar varios dispositivos a través de un bus de datos (I²C, SPI, Microwire, etc). Esta solución presenta dos inconvenientes principalmente:

- Las vibraciones pueden afectar a la medida.
- Las superficies de apoyo deben ser perfectamente planas para medir con precisión
- Es necesaria una etapa de amplificación.

En la ilustración 20 se muestra un ejemplo de uno de estos dispositivos.



Ilustración 20. Célula de carga analógica

3.1.1.5 Encoders.

Los codificadores rotatorios son mecanismos utilizados para medir la posición, de un eje. Un codificador rotatorio es un dispositivo electromecánico que convierte la posición angular de un eje, directamente a un código digital. Los tipos más comunes de encoders se clasifican en absolutos y relativos (conocidos también como incrementales):

- Un encoder absoluto ofrece un código único para cada posición, por lo que podemos obtener directamente la posición precisa en la que se encuentra. Estos pueden ser a su vez encoders multi-vuelta o de una única vuelta.
- Los encoder incrementales utilizan dos sensores posicionados con un desplazamiento de $\frac{1}{4}$ de ranura el uno del otro, generando dos señales de pulsos digitales desfasada en 90° o en cuadratura. Analizando como varían los pulsos es posible determinar el sentido y la velocidad de giro.

El desgaste en este tipo de dispositivos no es tan acusado como en el caso de los potenciómetros, sin embargo, para obtener medidas precisas es imprescindible contar con encoders de alta resolución, es decir, un número elevado de pulsos por revolución (PPR). Aun así, el problema de la alineación entre los ejes sigue existiendo en esta solución.

3.1.2 Sensores sin contacto físico

El uso de este tipo de sensores no implica contacto mecánico entre las distintas partes móviles involucradas en la medición, lo que evita desgastes debidos a fricción en los sensores y, en algunos casos, no es necesaria una perfecta alineación. Esta característica es especialmente útil para compensar posibles errores de fabricación y ensamblado en mecanismos rotatorios o de desplazamiento lineal.

3.1.2.1 Sensores de tiempo de vuelo (ToF).

La tecnología de tiempo de vuelo (Time of Flight – TOF) consiste en emitir haces de luz modulada hacia un objeto y medir el tiempo que tardan en regresar para estimar la distancia al objeto. La modulación hace posible

distinguir el pulso de la luz ambiente, ya sea natural o artificial. La ilustración 21 muestra el principio de funcionamiento de este tipo de sensor.

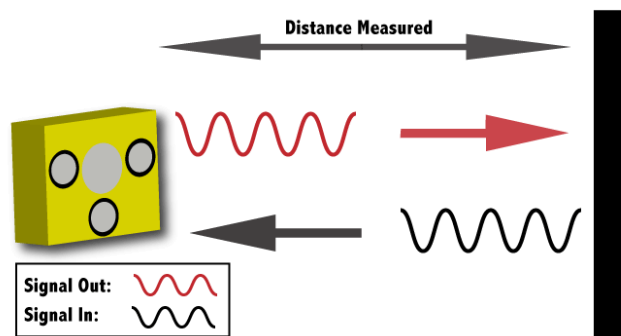


Ilustración 21. Principio de funcionamiento de sensor ToF

Este tipo de sensores puede emplearse para medir la compresión de los muelles a lo largo de un eje, por ejemplo, para estimar la masa de un objeto, del mismo modo que empleando potenciómetros deslizantes. Entre sus ventajas destacan:

- Medida realizada sin contacto físico.
- No requiere una alineación milimétrica para obtener una medida precisa.
- Múltiples dispositivos se pueden conectar a través de buses digitales (I²C, SPI, etc)
- Reducido peso del dispositivo.
- Tamaño reducido.

Sin embargo, tienen algunos inconvenientes:

- Posibles interferencias de potentes fuentes de luz externa, especialmente en exteriores con el sol.
- Es necesario añadir a la estructura existente superficies adicionales que permitan la medición.

3.1.2.2 Sensores de efecto Hall.

Usando sensores de efecto Hall, cuyo funcionamiento fue explicado en el apartado 3.1.1.3, e imanes permanentes es posible desarrollar circuitos que permitan medir distancias pequeñas e incluso ángulos. Mediante la inclusión de un imán.

Otra solución más conveniente es el uso de encoders o sensores de ángulo basados en efecto hall disponibles comercialmente y que integran toda la circuitería en un encapsulado de pequeñas dimensiones. Esta solución consta de un imán permanente colocado en el eje de la articulación y un circuito integrado estacionario, el circuito integrado proporciona la posición exacta del imán. Estos dispositivos tienen resoluciones inferiores a 0.05° y pueden ser controlados a través de buses digitales (I²C, SPI, etc). Además, algunos de ellos disponen de algoritmos que corrigen de forma automática errores de alineación

Esta solución resuelve el problema de la necesidad de existencia de contacto físico, proporciona escalabilidad gracias al uso de un bus compartido y es tolerante a errores de alineamiento.

3.2 Soluciones escogidas

3.2.1 Encoder magnético AS5047D

Inicialmente el dispositivo escogido fue el AS5048B, un sensor de fácil uso capaz de medir ángulos con una resolución de 14 bits. Mediante un array de sensores hall, un conversor analógico digital y un DSP, es capaz de medir la posición absoluta y la rotación de un imán colocado sobre él.

Permite acceder al dato del ángulo a través de un registro interno cuando se conecta a un bus SPI en su versión AS5048B o I²C en su versión AS5048A. En ambos casos el resultado es accesible mediante una salida PWM. La conexión mediante bus permite que múltiples dispositivos se conecten en cascada, permitiendo una reducción en el número de cables totales, siendo esta opción especialmente útil en aplicaciones como las comentadas en el presente trabajo.

El circuito integrado permite programar la posición cero, permitiendo realizar una calibración por software de la posición neutral de la articulación en cada inicio.

Sus principales características son:

- No necesita programador externo
- Alta precisión y resolución
- Fácil uso
- Bajo coste
- Conexión mediante SPI o I²C y PWM
- 14 bits de resolución (0.0219°/LSB)
- Posición programable
- Inmune a campos magnéticos externos
- Tolerante a errores de alineación y separaciones con el imán variable
- Amplio rango de temperaturas (-40°C a 150°C)
- Operación a 3.3V o 5V
- Posibilidad de conectar en cascada

Se suministra en un encapsulado TSSOP de 14 pines y unas dimensiones de 5 x 6.4mm, lo que lo hace ideal para aplicaciones con reducido espacio disponible.

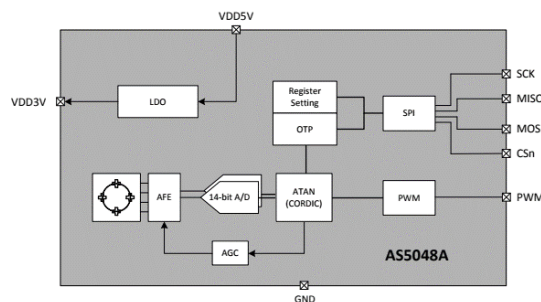


Ilustración 22. Esquema interno del sensor AS5048D

Sin embargo, por problemas de suministro con el proveedor, se decidió optar por una versión similar del mismo fabricante, el AS5047D. Este dispositivo funciona del mismo modo que el anterior, incluso comparte muchas de sus características (resolución, rangos de temperatura, tensiones de alimentación, etc), sin embargo, pierde algunas de ellas. Sus principales funcionalidades son:

- No necesita programador externo
- Alta precisión y resolución
- Fácil uso

- Bajo coste
- Conexión mediante SPI (Max. 10 MHz) y PWM
- 14 bits de resolución (0.0219°/LSB)
- Inmune a campos magnéticos externos
- Posición programable
- Amplio rango de temperaturas (-40°C a 150°C)
- Operación a 3.3V o 5V
- Posibilidad de conectar en cascada
- Salida incremental de pulsación configurable

Se suministra en un encapsulado TSSOP de 14 pines y unas dimensiones de 5 x 6.4mm, lo que lo hace ideal para aplicaciones con reducido espacio disponible. Las ilustraciones 23 y 24 muestran información referente al *pinout* del dispositivo.

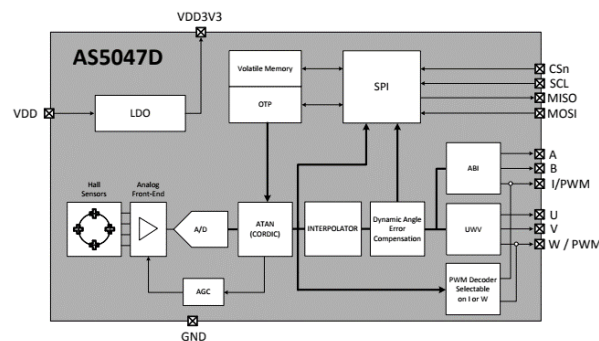


Ilustración 23. Esquema de funcionamiento del sensor AS5047D

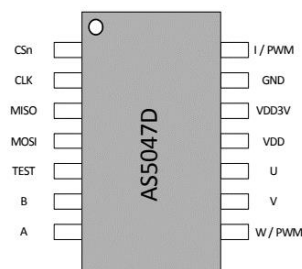


Ilustración 24. Pinout del sensor AS5047D

El dispositivo posee un algoritmo de compensación que elimina el retardo en la medida cuando se emplea en aplicaciones de giro constante como ejes de motores. Sin embargo, en el caso de aplicación considerada, esta característica no aporta ninguna ventaja.

3.2.1.1 Conexionado

EL circuito integrado funcionará a conectado a una tensión de alimentación de 3.3V y se comunicará con el microcontrolador principal mediante SPI con una frecuencia de reloj de 1 MHz. Es necesario un único componente pasivo externo, un condensador de 100nF. En la ilustración 25 se muestra el esquema básico de conexionado a 3.3V.

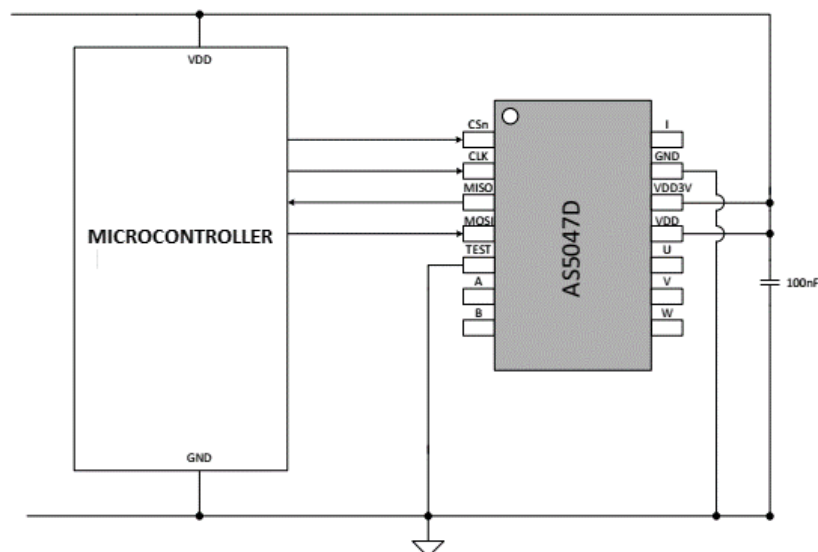


Ilustración 25. Esquema de conexionado para funcionamiento a 3.3v

El bus SPI debe ser configurado para trabajar en modo 1, es decir, reloj de polaridad positiva (activo a nivel alto) y muestreo de bit en flanco de bajada, tal y como se indica en la ilustración 26.

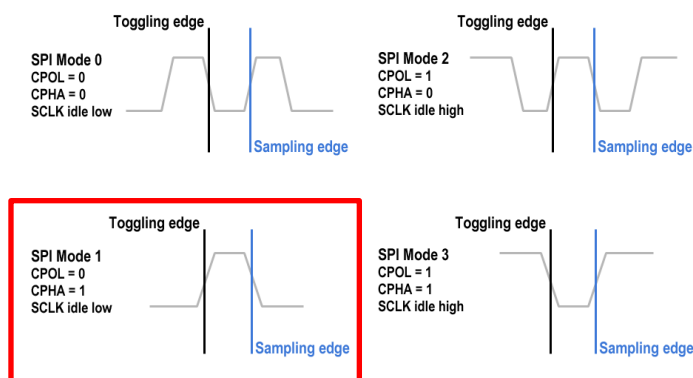


Ilustración 26. Modos de funcionamiento del bus SPI

3.2.1.2 Formato de la trama de comunicación

Para poder acceder a los registros de control y datos del dispositivo, debe enviarse una petición de lectura de 16 bits, la cual incluye los campos mencionados en la tabla 5:

Tabla 5. Campos de la trama de petición lectura/escritura

Bits	Campo
15	Paridad (par). Calculada con los primeros 15 bits
14	0: Escritura de registro. 1: Lectura de registro
13-0	Dirección del registro

Tras recibir una petición de lectura, el dispositivo enviará al host una respuesta también de 16 bits con los campos que aparecen en la tabla 6, cuando la operación requiera de la lectura de varios registros se seguirá la secuencia mostrada en la ilustración 27:

Tabla 6. Campos de la trama de respuesta del sensor

Bits	Campo
15	Paridad (par). Calculada con los primeros 15 bits
14	0: Petición correcta 1: Error en petición
13-0	Dato del registro leído

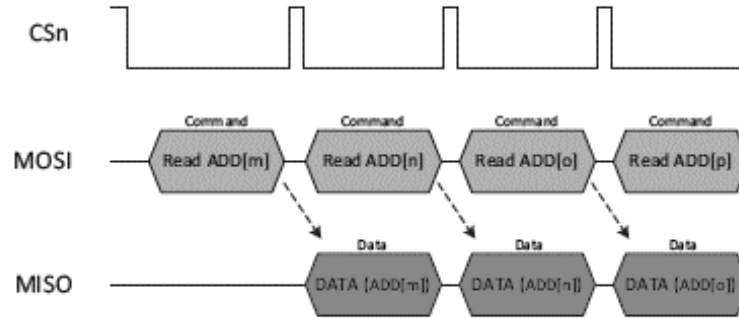


Ilustración 27. Trama de lectura de registro

En la ilustración 28 se muestra una captura real de una operación de lectura del registro 0x3FFF.

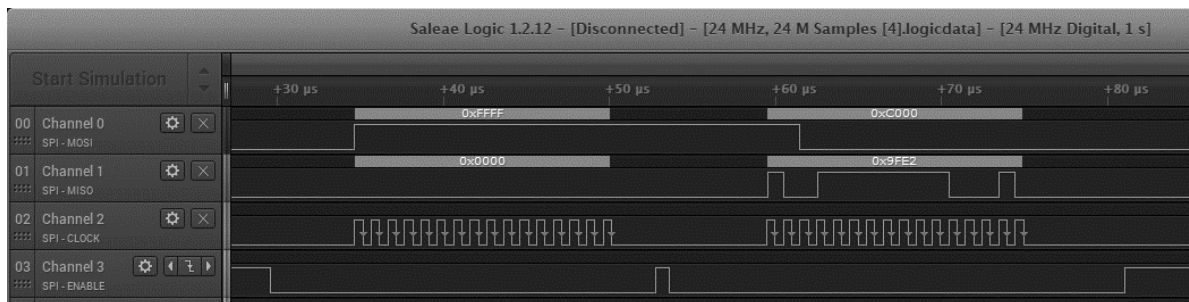


Ilustración 28. Captura de la trama de datos durante la lectura del ángulo

En caso de enviar una petición de escritura de registro, inmediatamente después de ser enviada, es necesario emitir otro *frame* de 16 bits con la información descrita en la tabla 7:

Tabla 7. Campos trama de escritura

Bits	Campo
15	Paridad (par). Calculada con los primeros 15 bits
14	0
13-0	Dato a escribir en el registro

3.2.1.3 Inicialización

No es necesario inicializar el dispositivo antes de usarse, siendo opcional programar una posición “CERO”. La calibración del punto “CERO” juega un papel fundamental, ya que este indica que sobre el brazo no se están aplicando fuerzas. El proceso de calibración consiste en desactivar los servos de las articulaciones, para que estas

no presenten cargas y caigan a su posición de reposo, una vez en este estado, se indica al microcontrolador que en dicho estado la deflexión articular es 0. El dato de ángulo es accesible en cualquier momento.

3.2.1.4 Registros de control

A pesar de que el integrado incluye multitud de registros con varias funcionalidades, en este caso, muchas de ellas no se utilizan, siendo necesarios sólo dos:

- Registro 0x3FFE. Ángulo medido con compensación dinámica. Es un registro de 16 bits que contiene el resultado de la conversión del ángulo del imán tal y como se muestra en la tabla 8. El resultado está expresado en 0.02197°/LSB.

Tabla 8. Campos del registro 0x3FFE del AS5047D

Bits	Campo
15-14	-
13-0	Ángulo leído

- Registro 0x3FFC. Registro de diagnóstico. Es un registro de 16 bits que contiene información acerca del estado del dispositivo. En nuestro caso, ha sido usado para validar el imán durante el montaje inicial únicamente. Contiene los campos mostrados en la tabla 9.

Tabla 9. Campos del registro 0x3FFC del AS5047D

Bits	Campo
15-12	-
11	1: Campo magnético muy débil
10	1: Campo magnético muy fuerte
9	1: CORDIC Overflow. Medida no fiable
8	0: Bucles internos no listos 1: Bucles internos listos
7-0	Valor de ganancia automática

- Registros 0x0016 y 0x0017. Registro de ajuste de posición 0. Son registros de 16 bits que contienen la posición considerada como ángulo 0 por el dispositivo. El registro 0x0017 contiene los 8 bits más significativos de dicha posición mientras que el 0x0016 contiene los 5 menos significativos además de dos bits que activan o desactivan los *flags* de error de campo magnético del imán. En las tablas 10 y 11 se describe el contenido de ambos registros.

Tabla 10. Campos del registro 0x0016 del AS5047D

Bits	Campo
15-8	-
7-0	8 bits más significativos del cero

Tabla 11. Campos del registro 0x0017 del AS5047D

Bits	Campo
15-8	-
7	1: Flag de campo magnético débil habilitado 0: Flag de campo magnético débil deshabilitado
6	1: Flag de campo magnético fuerte habilitado 0: Flag de campo magnético fuerte deshabilitado
5-0	5 bits menos significativos del cero

3.2.1.5 Proceso de lectura

Para leer el valor final del ángulo únicamente es necesario acceder al valor del registro que contiene el dato. No es necesario realizar ninguna acción previa, inicializar conversión o esperar a que el dato esté listo.

3.2.2 Sensor VL6180X

El VL6180 es un sensor de rango basado en tiempo de vuelo. Permite medir la distancia con respecto a un objeto colocado frente a él independientemente de su reflectividad. En lugar de estimar el rango midiendo la cantidad de luz reflejada por el objeto, la cual depende de las superficies y la luz ambiental, la tecnología aplicada en este sensor mide de forma precisa el tiempo que tarda una señal lumínica en llegar al objeto y volver. Emplea un láser VCSEL infrarrojo para emitir el haz, por lo que es completamente invisible al ojo humano.

El sensor es capaz también de medir luz ambiental, aunque para la aplicación en la que se pretende utilizar, esto carece de utilidad.

Es capaz de funcionar en modo continuo, realizando automáticamente las medidas, o en modo disparo, midiendo únicamente bajo demanda (*single shot*).

Sus principales características son:

- Medida absoluta de rango entre 0-10cm con resolución de 1mm. (la medición de distancias mayores depende de las condiciones del entorno)
- Medida absoluta de rango de hasta 60cm con resolución reducida de 3mm.
- Encapsulado de pequeñas dimensiones. 4.8 x 2.8 x 1.0 mm
- Pocos componentes externos necesarios
- Conexión I²C (Max. 400 kHz)
- 2 GPIOs programables
- Alimentación a 2.8V (requiere circuito de adaptación de niveles de tensión)

3.2.2.1 Conexión

Dado que este sensor trabaja a una tensión inferior a la del conjunto de sensores y microcontrolador, es necesario añadir una serie de componentes que le permitan trabajar junto con los demás. Estos componentes son:

- Regulador de tensión variable. Reduce la tensión desde los 5V recibidos por el puerto USB hasta los 2.8V necesarios
- Conversor de nivel bidireccional. El sensor se conecta al bus I²C a través de este dispositivo. Convierte la señal del bus procedente del microcontrolador, con nivel de 3.3V a los 2.8V que soporta el sensor.

Son necesarios únicamente 5 componentes pasivos externos:

- Condensador 100nF
- Condensador 4.7nF
- 3 resistencias

En la ilustración 29 se muestra un esquema de conexionado del sensor.

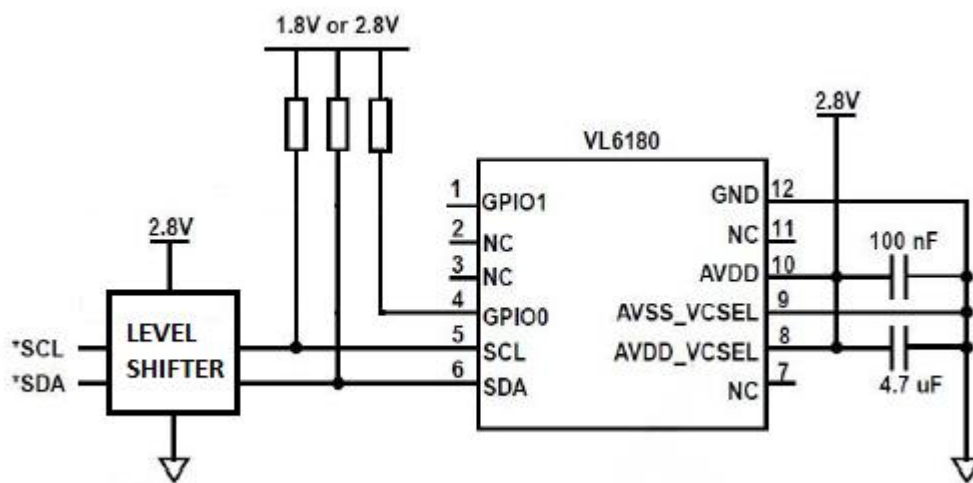


Ilustración 29. Conexionado del sensor VL6180X

Las resistencias de PULL-UP pueden colocarse antes o después del conversor de nivel, siendo obligatoria la resistencia de la entrada GPIO0 a 2.8V por ser inicialmente un pin de activación de dispositivo. El valor de las resistencias depende de la velocidad del bus, estando los valores típicos comprendidos entre 1-10KOhm

La velocidad máxima del reloj del bus es de 400kHz.

3.2.2.2 Formato de la trama de comunicación

Para poder acceder a los registros de control y datos del dispositivo, debe enviarse una petición de lectura o escritura siguiendo el protocolo de comunicación I²C, cada una de ellas diferente.

Al comienzo del proceso de escritura, el microcontrolador con una inicia la conexión con una petición de escritura al dispositivo, en el primer byte transferido de indica la dirección del dispositivo y que se trata de una petición de escritura. A continuación, se envían 3 bytes, los dos primeros indican el registro a escribir, el último de ellos el dato a escribir en él. Por último, se finaliza la conexión. En la ilustración 30 se indica el formato de la trama de escritura, en la ilustración 31 se muestra una captura de la trama durante el proceso.

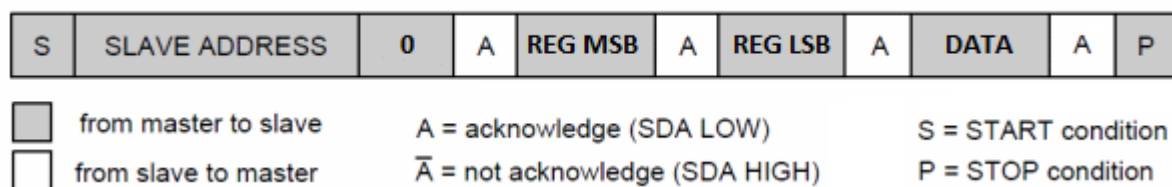


Ilustración 30. Trama de escritura de registro

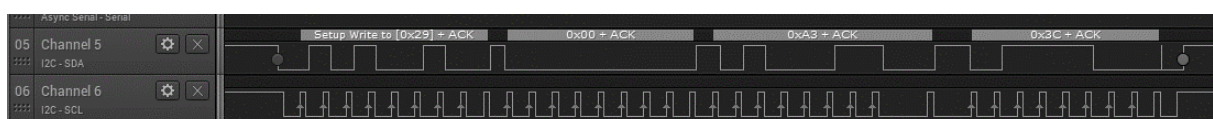


Ilustración 31. Captura de la trama durante proceso de escritura del registro 0x00A3

Al comienzo del proceso de lectura, el microcontrolador inicia la conexión con una petición de escritura al dispositivo, en el primer byte transferido de indica la dirección del dispositivo y que se trata de una petición de escritura. A continuación, se envían 2 bytes indicando el registro al que se desea acceder. A continuación, se repite la condición de inicio y envía de nuevo la dirección del dispositivo, indicando esta vez que se trata de una operación de lectura. Por último, el sensor envía el dato disponible en el registro y se finaliza la conexión. En la ilustración 32 se indica el formato de la trama de lectura, en la ilustración 33 se muestra una captura de la trama durante el proceso de escritura.

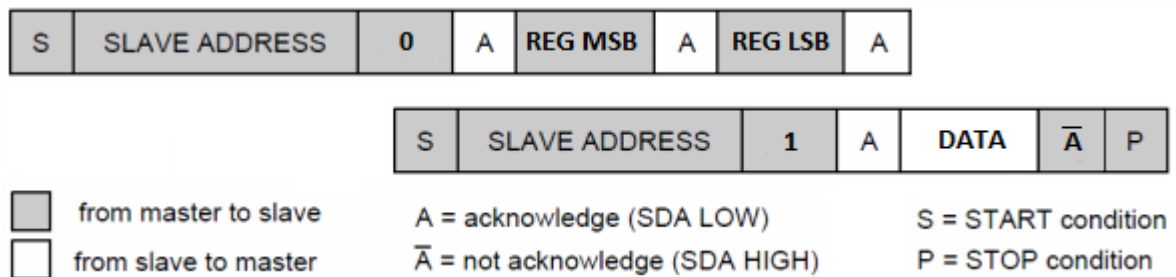


Ilustración 32. Trama de lectura de registro

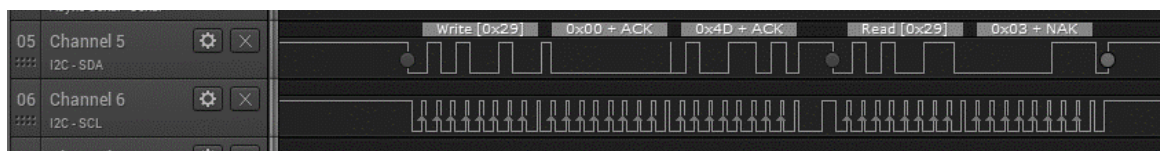


Ilustración 33. Captura de trama de lectura del registro 0x004D

3.2.2.3 Inicialización

En primer lugar, durante la inicialización del dispositivo o después de esta, y con el fin de sacarlo del modo *SLEEP*, el pin GPIO0 debe ser puesto a nivel alto. En segundo lugar, es necesario esperar que el firmware interno del sensor se inicialice, esto toma en torno a 1ms. Tras la espera, debemos aplicar la configuración recomendada, la cual se indica en el datasheet. El proceso completo se muestra en el diagrama de flujo de la ilustración 34.

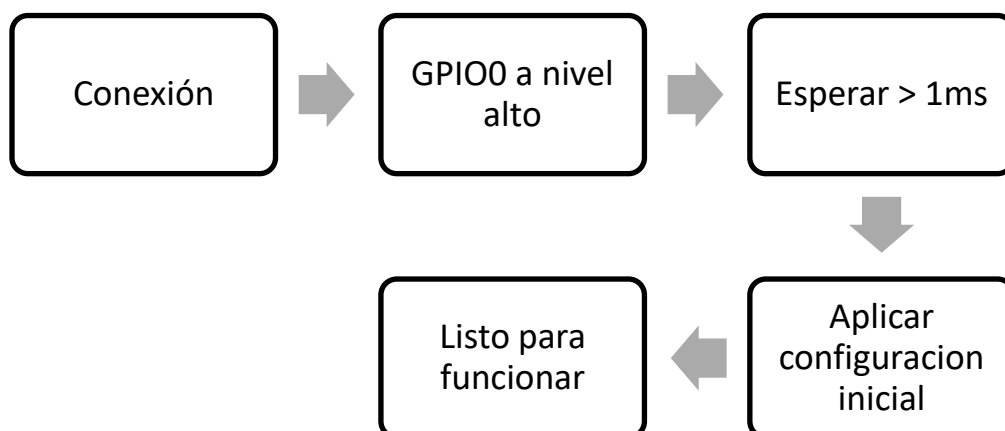


Ilustración 34. Pasos para la inicialización del sensor VL6810X

3.2.2.4 Registros de control

Los registros empleados para controlar el dispositivo son los siguientes:

- 0x0015. System Interrupt Config.

Contiene los flags de las interrupciones generadas por el sensor. Los campos de este registro se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Campos del registro 0x0015 del VL6810X

Bits	Campo
7-3	-
2	Flag de interrupción de error
1	Flag de interrupción de medida de luz ambiental
0	Flag de interrupción de rango

- 0x0018. System Range Start.

En este registro se configura el modo de funcionamiento y se indica el inicio del ciclo de medida. Los campos de este registro se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Campos del registro 0x0018 del VL6180X

Bits	Campo
7-2	-
1	1: Funcionamiento en modo continuo 0: Funcionamiento bajo demanda (<i>single shot</i>)
0	1: Inicio del proceso de medida

- 0x0024. Part to Part Offset.

Este registro contiene el valor de calibración para el offset de medida del dispositivo. Se trata de un registro volátil que recuperará su valor de fábrica cada vez que el dispositivo se apague. Debe calibrarse cada vez que se ajuste el valor del *UPSCALE FACTOR*, cargando el valor original cuando se configure el dispositivo para leer medidas entre 0-200mm, la mitad del valor original para medidas entre 0-400mm o un tercio del valor original para medidas entre 0-600mm. Los campos de este registro se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Campos del registro 0x0024 del VL6180X

Bits	Campo
7-0	Offset de medida

- 0x004D. Range Result Status.

Este registro contiene información acerca de posibles errores en el proceso de medida, flags de información del resultado de la medida y el flag de dispositivo ocupado. Los campos de este registro se muestran en la tabla 15.

Tabla 15. Campos del registro 0x004D del VL6180X

Bits	Campo
7-4	Códigos de error
3	1: Interrupción por rango inferior al mínimo
2	1: interrupción por rango superior al máximo
1	1: Interrupción por medida finalizada
0	0: Dispositivo ocupado 1: Dispositivo libre

- 0x004F. Result Interrupt Status.

Este registro contiene los flags de interrupción de los resultados de medida de rango y luz ambiental. Los campos de este registro se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Campos del registro 0x004F del VL6180X

Bits	Campo
7-6	Códigos de error
5-3	Flags de interrupción de medida de luz ambiental
2-0	Flags de interrupción de medida de rango

- 0x0062.Range Value.

Este registro contiene el resultado de la medida. En función del valor del registro de rango el resultado de este registro viene expresado en 1mm/LSB si el *UPSCALE FACTOR* se ha configurado para medir de 0-200mm, 2mm/LSB si se ha configurado para medir de 0-400mm o 3mm/LSB si se ha configurado para medir de 0-600mm. Los campos de este registro se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Campos del registro 0x0062 del VL6180X

Bits	Campo
7-0	Resultado de la conversión

- 0x0097. Upscale Factor.

Este registro configura el rango máximo que el sensor es capaz de medir, siendo el máximo 600mm. Para medidas de 0-200mm debe cargarse el valor 0xFD, para medias de 0-400mm debe cargarse el valor 0x7F y para medidas de 0-600mm debe cargarse el valor 0x54. Los campos de este registro se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Campos del registro 0x0097 del VL6180X

Bits	Campo
7-0	<i>UPSCALE FACTOR</i>

3.2.2.5 Proceso de lectura

Para iniciar el proceso de lectura es necesario dar una orden al dispositivo escribiendo el valor hexadecimal 0x01 en el registro 0x0018 (*System Range Start*), con esto se indica que se desea realizar una única lectura de rango (*Single Shot Mode*). Una vez iniciado el proceso, es necesario esperar a que la medida se haya realizado, el tiempo que el dispositivo tarda en finalizar el proceso depende de la distancia a la que se encuentre el objetivo y el albedo de este. La medición habrá finalizado cuando el bit 2 del registro 0x004F (*Result Interrupt Status*) sea igual a 1, en este momento podremos leer el resultado accediendo al registro 0x0062 (*Range Value*). Una vez

hayamos acabado, es necesario borrar los flags de interrupción escribiendo el valor 0x07 en el registro 0x0015 (*System Interrupt Config*). El dispositivo permanecerá a la espera de una nueva orden de lectura.

Antes de indicar cualquier orden al dispositivo, será necesario consultar si el dispositivo está ocupado accediendo al bit 0 del registro 0x004D (*Range Result Status*). En la ilustración 35 se muestra un diagrama de flujo del proceso.

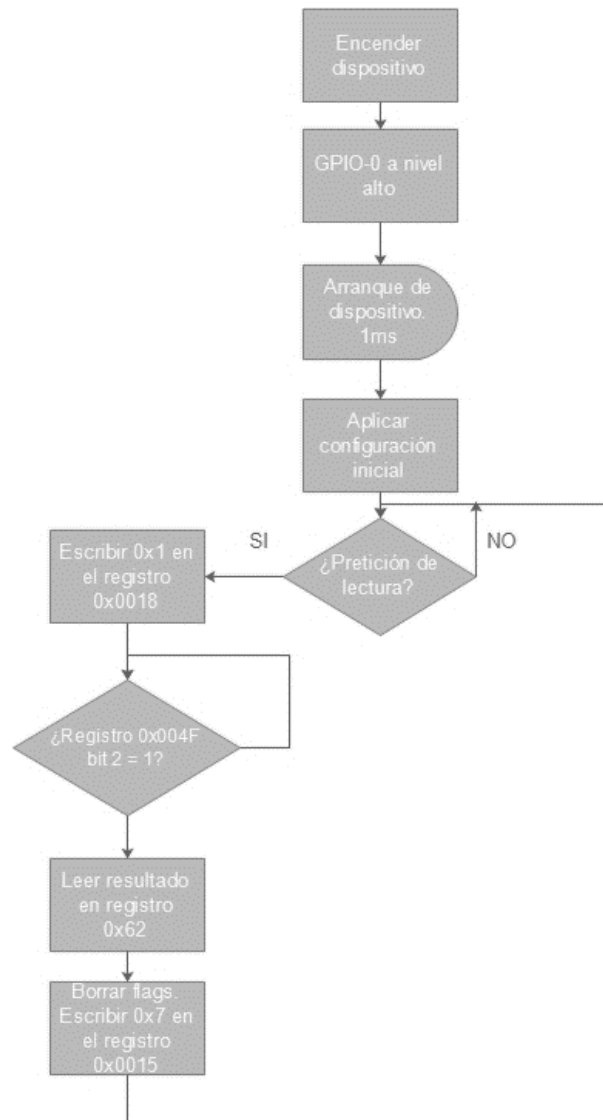


Ilustración 35. Diagrama de flujo del proceso de lectura.

3.2.3 Giróscopo MPU6050

El MPU6050 del fabricante InvenSense es un dispositivo MEMS que contiene en un mismo encapsulado acelerómetro y giróscopo, ambos de 3 ejes. El giróscopo se empleará en el presente trabajo para comparar la velocidad angular del brazo obtenida por derivación de la medida de ángulo con la velocidad real. La medida directa de velocidad angular en las articulaciones permite mejorar la estimación y control del robot manipulador, ya que el nivel de ruido de esta medida será típicamente mejor que la obtenida a partir de la posición.

Las principales características de este dispositivo son:

- 16 bits de resolución para acelerómetro y giróscopo.
- Escala máxima configurable de +/- 250, 500, 1000 y 2000°/s
- Encapsulado de pequeñas dimensiones. 4.0 x 4.0 x 0.9 mm
- Pocos componentes externos necesarios
- Conexión I²C (Max. 400 kHz)
- Alimentación a 3.3V

3.2.3.1 Conexionado

El circuito integrado funcionará conectado a una tensión de alimentación de 3.3V y se comunicará con el microcontrolador principal mediante I²C con una frecuencia de reloj de 400 kHz. El dispositivo funciona haciendo uso de un oscilador interno, por lo que para hacerlo funcionar solo es necesario añadir 4 condensadores externos. En la ilustración 36 se muestra el esquema básico de conexionado.

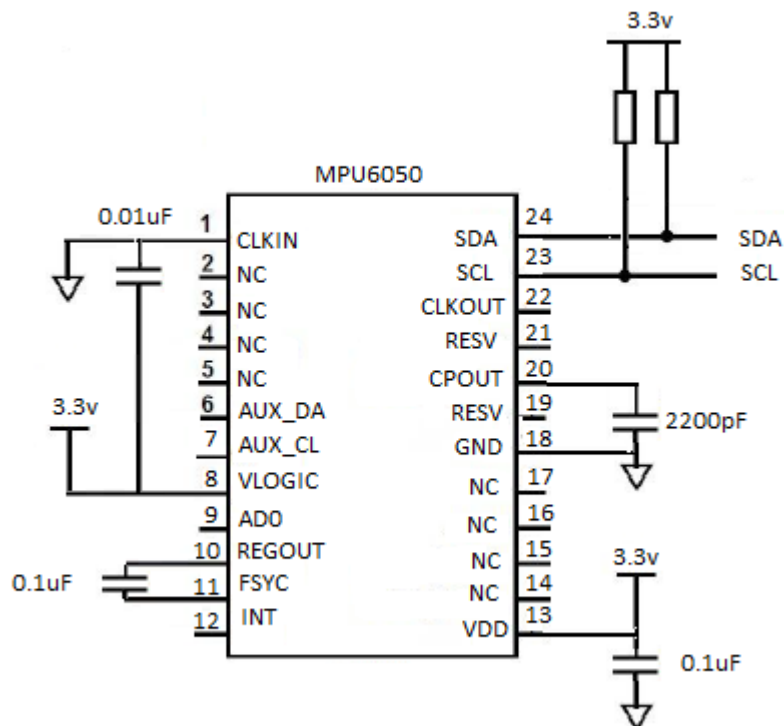


Ilustración 36. Conexionado del sensor MPU6050

3.2.3.2 Formato de la trama de comunicación

Para poder acceder a los registros de control y datos del dispositivo, hay que hacer uso del protocolo I²C. Al comienzo del proceso de escritura, el microcontrolador con una inicia la conexión con una petición de escritura al dispositivo, en el primer byte transferido de indica la dirección del dispositivo y que se trata de una petición de escritura. A continuación, se envían 2 bytes, el primero de ellos indica el registro a escribir, el último el dato a escribir en él. Por último, se finaliza la conexión. En la ilustración 37 se indica el formato de la trama de escritura, en la ilustración 38 se muestra una captura de la trama durante el proceso.

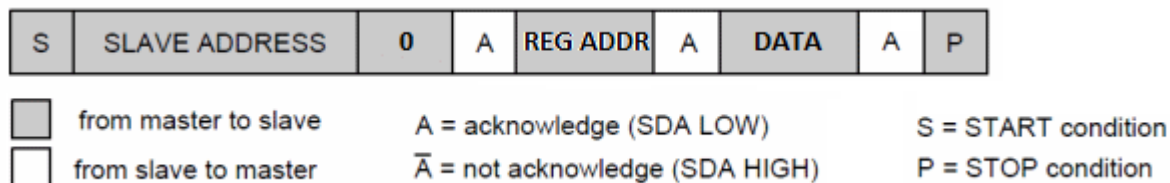


Ilustración 37. Trama de escritura de registro

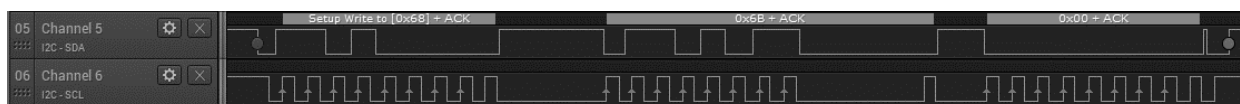


Ilustración 38. Captura de la trama de escritura del registro 0x6B

Al comienzo del proceso de lectura, el microcontrolador inicia la conexión con una petición de escritura al dispositivo, en el primer byte transferido de indica la dirección del dispositivo y que se trata de una petición de escritura. A continuación, se envía 1 byte indicando el registro al que se desea acceder. En el siguiente paso, se repite la condición de inicio y envía de nuevo la dirección del dispositivo, indicando esta vez que se trata de una operación de lectura. Por último, el sensor envía el dato disponible en el registro y se finaliza la conexión. En la ilustración 39 se indica el formato de la trama de lectura, en la ilustración 40 se muestra una captura de la trama durante el proceso.

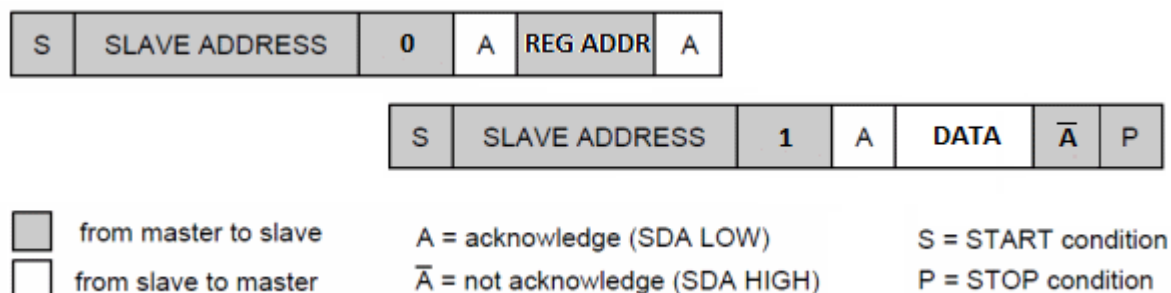


Ilustración 39. Trama de lectura de registro

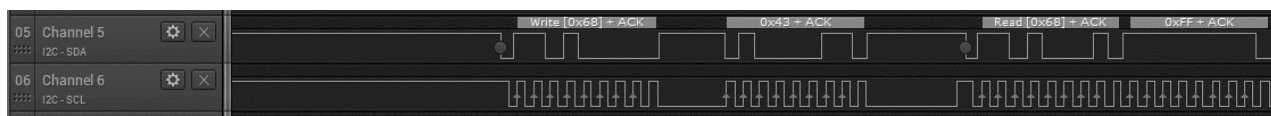


Ilustración 40. Captura de la trama de lectura del registro 0x43

3.2.3.3 Inicialización

La inicialización de este dispositivo se realiza de forma sencilla y requiere únicamente dos pasos. En primer lugar, debe seleccionarse la fuente de reloj que hará funcionar el circuito integrado y desactivar el estado de reposo. Una vez hecho esto, será necesario ajustar el valor máximo de medida, si procede, pudiendo utilizarse el valor por defecto de 250°/s. Finalmente, podrán realizarse las medidas de velocidad angular. En la ilustración 41 se muestra un diagrama con las etapas de configuración.

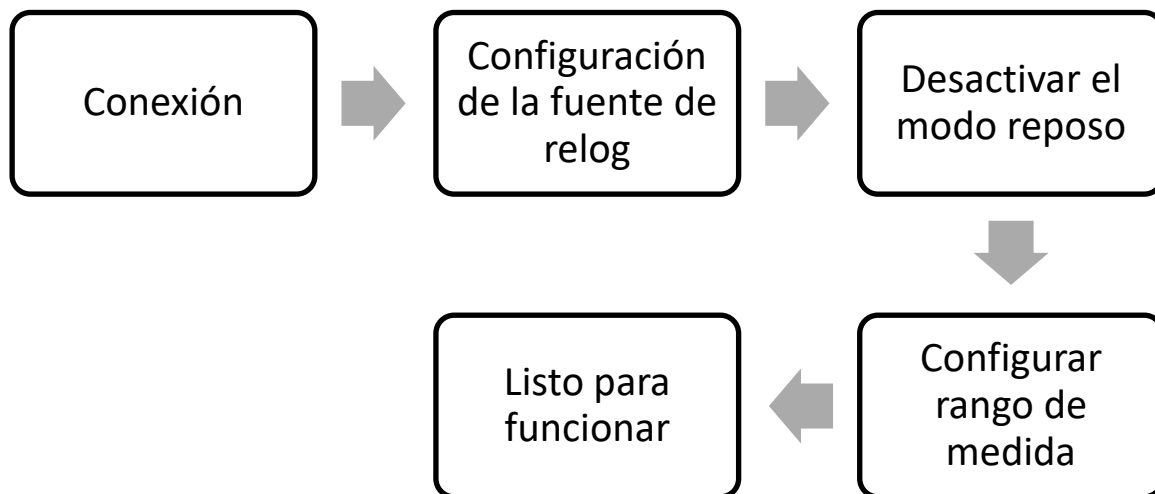


Ilustración 41. Pasos para la inicialización del sensor MPU6050

3.2.3.4 Registros de control

- 0x6B: Power management 1.

Este registro permite seleccionar la fuente de reloj así como llevar al dispositivo a al estado de reposo. Los tres bits menos significativos indican la fuente de reloj, el bit 6 permite activar o desactivar el estado de reposo. En la tabla 19 se muestran los distintos campos de este registro.

Tabla 19. Campos del registro 0x6B del MPU6050

Bits	Campo
7	-
6	1: Reposo activado
5-4	-
3-0	0: Oscilador interno de 8 MHz 1: PLL con el Gyro X de referencia 2: PLL con el Gyro Y de referencia 3: PLL con el Gyro Z de referencia 4: PLL con reloj externo de 32.768 kHz de referencia 5: PLL con reloj externo de 19.2 MHz de referencia 6: Reservado 7: Reloj desactivado.

- 0x1B: Gyroscope Configuration.

Este registro permite configurar el valor máximo de lectura. En la tabla 20 se muestran los distintos campos de este registro.

Tabla 20. Campos del registro 0x6B del MPU6050

Bits	Campo
4-3	0: ± 250 °/s 1: ± 500 °/s 2: ± 1000 °/s 3: ± 2000 °/s

3.2.3.5 Proceso de lectura

Para leer el valor de velocidad angular únicamente es necesario leer el valor del registro que contiene el dato. No es necesario realizar ninguna acción previa, inicializar conversión o esperar a que el dato esté listo.

3.2.4 Microcontrolador STM32L031K6

Para controlar todo el banco de sensores e integrarlos en el Sistema ya existente, es necesario un microcontrolador que incluya los siguientes periféricos:

- Bus SPI
- Bus I²C
- UART
- Conversor analógico-digital
- Pines de entrada y salida digital

El STM32L031K6 es un microcontrolador del fabricante ST Microelectronics que posee un núcleo ARM Cortex M0+ de 32 bits que opera a 32MHz. Sus características principales son:

- Alimentación de 1.65 a 3.6 V
- 32 Kbytes de memoria flash
- 8 Kbytes de RAM
- 1 Kbyte de EEPROM
- 38 Pines de entrada y salida
- Conversor analógico-digital de 12 bits y 10 canales
- Bus SPI
- Bus I²C
- UART
- Encapsulado LQFP de 32 pines

Para facilitar el montaje y prototipado, se trabaja sobre la plataforma NUCLEO-L031K, una pequeña placa de desarrollo similar a Arduino. Esta placa contiene el microcontrolador en cuestión, además del programador ST-Link V2 necesario para la carga del código. Tiene accesibles la mayoría de los pines del microcontrolador, reservando otros para la conexión con el programador y otros elementos como los osciladores. Contiene además

un regulador de tensión que reduce los 5V del puerto USB a 3.3V, lo que permite alimentar el conjunto de sensores si la necesidad de una fuente externa. El pinout de la placa se muestra en la ilustración 42.

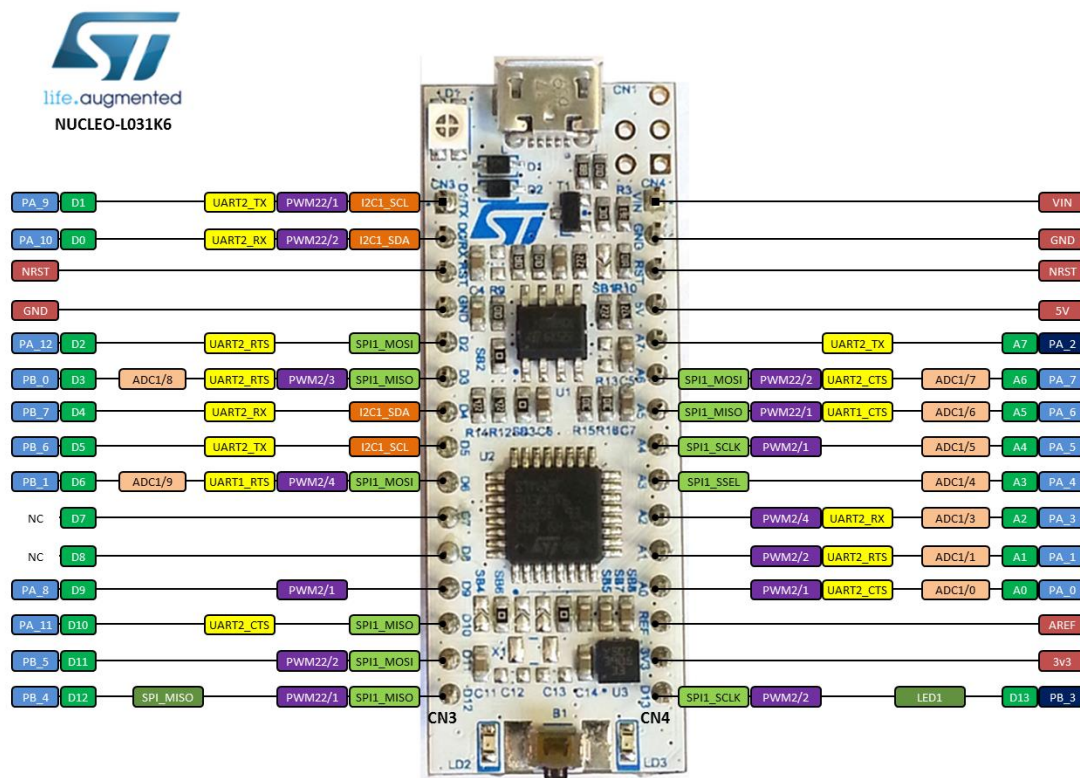


Ilustración 42. Pinout de la placa Nucleo-L0

Para el montaje se han utilizado los pines que se detallan en la tabla 21.

Tabla 21. Relación de pines utilizados en el montaje

Pin LQFP 32	Pin STM32L0	Pin Nucleo32-L0	Función
1	VDD	N/A	Alimentación
4	NRST	Reset	Reset
5	VDDA	N/A	Alimentación ADC
10	PA4	A3	GPIO_OUT (SPI SS)
11	PA5	A4	SPI_SCK
12	PA6	A5	SPI_MISO
13	PA7	A6	SPI_MOSI
16	VSS	N/A	Alimentación
17	VDD	N/A	Alimentación
19	PA9	D1/TX	USART_TX
20	PA10	D0/RX	USART_RX
29	PB6	D5	I2C_SCL
30	PB7	D4	I2C_SDA
32	VSS	N/A	Alimentación
N/A	N/A	3.3V	Alimentación sensores
N/A	N/A	GND	Alimentación sensores

4 SOFTWARE DEL MICROCONTROLADOR

En este capítulo se describe la solución software implementada para la lectura y el posterior envío de datos de cada uno de los sensores. Se hará un repaso por los distintos archivos que componen el programa, especificando sus métodos y su uso.

4.1 Librería “stm32l0xx_hal.h”

Esta librería ha sido desarrollada por ST Microelectronics con la finalidad de facilitar al programador el uso de sus microcontroladores y ofrecer una excelente portabilidad entre dispositivos sin necesidad de realizar cambios mayores en el código. Las librerías HAL ponen a disposición del programador multitud de estructuras de datos y métodos que evitan programar a nivel de registros los distintos periféricos y usarlos de forma sencilla, lo que reduce enormemente el tiempo de desarrollo.

4.1.1. Dispositivo SPI

Para el bus SPI se utilizan los siguientes métodos.

- `HAL_SPI_Init(SPI_HandleTypeDef *hspi)`

Este método se encarga de inicializar el bus SPI con los parámetros deseados. Recibe como parámetro un puntero a un struct de datos con la configuración deseada. Devuelve un código con el estado del periférico.

- `HAL_SPI_Transmit(SPI_HandleTypeDef *hspi, uint8_t pData, uint16_t Size, uint32_t Timeout)`

Este método envía un dato por el bus SPI indicado sin usar interrupciones. Recibe como parámetros un puntero al struct de datos del bus a usar, un puntero al dato a enviar, el tamaño en bytes de los datos a enviar y una variable de timeout. Devuelve el estado de la transmisión.

- `HAL_SPI_TransmitReceive(SPI_HandleTypeDef *hspi, uint8_t pTxData, uint8_t pRxData, uint16_t Size, uint32_t Timeout)`

Este método envía un dato por el bus SPI indicado sin usar interrupciones a la vez que recibe otro dato desde el dispositivo esclavo. Recibe como parámetros un puntero al struct de datos del bus a usar, un puntero al dato a enviar, un puntero al buffer de recepción, el tamaño en bytes de los datos a enviar y una variable de timeout. Devuelve el estado de la transmisión.

4.1.2. Dispositivo I2C

Para el bus I²C se utilizan los siguientes métodos.

- `HAL_I2C_Init(I2C_HandleTypeDef *hi2c)`

Este método se encarga de inicializar el bus I²C con los parámetros deseados. Recibe como parámetros un puntero a un struct de datos con la configuración deseada. Devuelve un código con el estado del periférico

- `HAL_I2C_Mem_Write (I2C_HandleTypeDef * hi2c, uint16_t DevAddress, uint16_t MemAddress, uint16_t MemAddSize, uint8_t * pData, uint16_t Size, uint32_t Timeout)`

Este método escribe un bloque de datos en la posición de memoria especificada del dispositivo indicado. Recibe como parámetros un puntero al struct de datos del bus a usar, la dirección de memoria del dispositivo, la posición de memoria en la que queremos escribir, el tamaño del bloque de memoria del dispositivo, un puntero al dato que deseamos enviar, el tamaño en bytes de los datos a enviar y una variable de timeout. Devuelve el estado de la transmisión.

- `HAL_I2C_Mem_Read (I2C_HandleTypeDef * hi2c, uint16_t DevAddress, uint16_t MemAddress, uint16_t MemAddSize, uint8_t * pData, uint16_t Size, uint32_t Timeout)`

Lee una cantidad de datos desde una posición de memoria específica de un dispositivo indicado. Recibe como parámetros un puntero al struct de datos del bus a usar, la dirección de memoria del dispositivo, la posición de memoria inicial queremos leer, un puntero al buffer de recepción, número de bytes a recibir y una variable de timeout. Devuelve el estado de la transmisión.

4.1.3. Dispositivo UART

Para la UART se utilizan los siguientes métodos.

- `HAL_UART_Init(I2C_HandleTypeDef *huart2)`

Este método se encarga de inicializar la UART con los parámetros deseados. Recibe como parámetro un puntero a un struct de datos con la configuración deseada. Devuelve un código con el estado del periférico.

- `HAL_UART_Transmit(UART_HandleTypeDef *huart, uint8_t *pData, uint16_t Size, uint32_t Timeout)`

Este método envía un dato por la UART indicada sin usar interrupciones. Recibe como parámetros un puntero al struct de datos de la UART a usar, un puntero al dato a enviar, el tamaño en bytes de los datos a enviar y una variable de timeout. Devuelve el estado de la transmisión.

4.2 Librería “lectura.h”

Es una librería de desarrollo propio que contiene los métodos necesarios para inicializar los sensores nombrados anteriormente e interactuar con ellos para obtener los datos necesarios. También se encuentran en ella las definiciones de los registros de los dispositivos.

4.2.1. Métodos para el sensor de ángulo AS5047D:

- `void setPosAs5047(uint8_t device, uint16_t offset);`

Este método se utiliza para indicar al sensor de ángulo la referencia inicial o qué valor tiene su posición actual. Esto sirve para indicar el ángulo cero en nuestra aplicación. Recibe como parámetros el dispositivo que queremos configurar y el ángulo de referencia.

- `uint16_t As5047ReadReg(uint8_t device, uint16_t direccion);`

Este método permite leer el valor de un registro determinado del sensor de ángulo. Recibe como parámetros el dispositivo al que nos dirigimos y el registro deseado. Devuelve el dato contenido en el registro a leer.

- `uint16_t getAs5047Angle(uint8_t device);`

Este método permite acceder al valor de ángulo actual de cada sensor. Recibe como parámetros el sensor que deseamos leer. Devuelve el ángulo medido por el dispositivo en ese instante.

4.2.2. Métodos para el sensor de rango VL6180X:

- `void VL6180X_Write(uint16_t direccion, uint16_t registro, uint8_t dato);`

Este método se emplea para escribir un dato en el registro que se desee de un sensor determinado. Recibe como argumentos la dirección del sensor, el registro y el valor que se desea escribir.

- `uint8_t VL6180X_Read(uint16_t direccion, uint16_t registro);`

Este método se emplea para leer el valor de un registro determinado. Recibe como argumentos la dirección del sensor y el registro a leer. Devuelve el contenido del registro leído.

- `uint8_t VL6180X_Init(void);`

Este método inicializa el dispositivo y aplica la configuración básica de funcionamiento del sensor. Devuelve como resultado un “1” si el sensor está presente en el bus o un “0” si no ha sido encontrado.

- `void VL6180X_SetRange(uint8_t rango, uint8_t initialPtP);`

Este método se emplea para cambiar el rango de medida del sensor. Recibe como argumentos una variable de configuración de rango, siendo esta “1” para medidas comprendidas entre 0-200mm, “2” para medidas comprendidas entre 0-400mm y “3” para medias comprendidas entre 0-600mm. El otro valor que es necesario indicar es el offset de calibración, que debe ser leído durante el arranque y es distinto en cada sensor.

- `void VL6180X_SetMaxTime(uint8_t maxtime);`

Este método sirve para imponer un tiempo máximo de medida, si este tiempo se supera, la medida se aborta. Recibe como parámetro el tiempo máximo expresado en milisegundos (0-255);

- `void VL6180X_SetRangeOrder(void);`

Este método inicia el proceso de medida simple.

- `uint8_t VL6180X_GetBussyState(void);`

Este método permite conocer si el dispositivo está en reposo y es capaz de recibir órdenes. Devuelve el valor “1” si el sensor esta libre y “0” si está ocupado.

- `uint8_t VL6180X_GetResultReady(void);`

Este método indica cuando el nuevo valor de rango está disponible para ser leído. Devuelve un “1” si la medida se ha completado, en caso contrario devuelve un “0”.

- `uint8_t VL6180X_GetRangeResult(void);`

Este método devuelve la distancia medida por el sensor expresada en mm, mm/2 o mm/3 en función del rango máximo seleccionado con el método VL6810x_SetRange().

4.2.3. Métodos del acelerómetro-giróscopo MPU6050:

- `void configMPU6050Gyro(uint8_t Sensor, uint8_t MaxRate, uint8_t MaxAcc);`

Este método inicializa el acelerómetro y el giróscopo aplicando el valor máximo de lectura deseado para cada uno. Recibe como argumentos el sensor al que nos queremos dirigir, el valor máximo de aceleración y el valor máximo de velocidad angular.

- `void getMPU6050Gyro(uint8_t Sensor, int16_t *buff);`

Este método permite leer el valor de velocidad angular de todos los ejes del giróscopo. Recibe como argumentos el sensor al que nos dirigimos y un puntero a la posición de memoria en la que queremos guardar los datos.

4.3 Librería “structures.h”

Esta librería contiene la estructura de datos que se enviará al ordenador o cualquier otra plataforma que precise los datos. La estructura contiene los siguientes campos:

- `Uint8_t header[3]`: Cabecera de identificación del paquete, corresponde con las letras S, T y M
- `Uint8_t packetID`: Identificador de número de paquete. Usada para comprobar que no hay pérdidas de datos.
- `Uint8_t secCounter` y `uint8_t msCounter`: Estos dos campos contienen el tiempo que lleva el programa de medida en ejecución. Sirve como marca de tiempo para el programa de log.
- `Uint16_t AS5047D`: Este campo contiene el valor leído del sensor de ángulo AS5047D
- `int16_t GyroX`, `int16_t GyroY` y `int16_t GyroZ`: Estos campos contienen los valores de velocidad angular de cada uno de los ejes del giróscopo.
- `Uint16_t Range`: Este campo contiene el valor de la medida de rango del sensor ToF VL6180X.
- `Uint8_t checksum`: Campo de verificación usado para comprobar la integridad de los datos enviados. Es igual a la suma XOR de todos los bytes

4.4 Librería “comunicacion.h”

Esta librería contiene el método empleado para enviar datos a través de la UART.

- `void sendData(uint8_t *structPointer, uint8_t structSize);`

Este método se encarga de transmitir todos los campos del struct de datos al ordenador o equipo de logeo. Recibe un puntero a la estructura de datos y su tamaño en bytes.

5 SETUP DE PRUEBAS

Este capítulo describe el banco de pruebas utilizado para cada uno de los sensores y los distintos test llevados a cabo para evaluar las características más relevantes de los dispositivos seleccionados.

5.1 Encoder magnético AS5047D

Para este sensor se pretenden poner a prueba los siguientes aspectos:

- Característica de ruido estática.

Para comprobar la estabilidad de la medida y la posible existencia de ruido en un entorno sin interferencias, se mantendrá el imán en una posición fija y se realizará una captura de los datos. Posteriormente se obtendrán los valores máximo, mínimo, medio y la desviación típica.

Este experimento se repetirá para separaciones entre imán y sensor de 2 y 4mm. Los mismos casos se realizarán para desviaciones del imán respecto al eje del circuito integrado en torno a 2mm.

- Resistencia a interferencias magnéticas externas.

El objetivo de este test es observar cómo afecta a la medida la existencia de campos magnéticos fuertes en las inmediaciones del sensor. Para llevar a cabo este experimento, se realizarán las mismas pruebas que en caso anterior, con la diferencia de que, esta vez, se acercará y alejará un imán de la zona de medida con la intención de inducir una fuerte interferencia muy cerca de la zona de medida.

Este test simulará el posible ruido producido por la alta corriente que fluye por los cables que alimentan los motores del multirrotor.

- Exactitud de la medida.

Con este test se pretende conocer la exactitud de la medida a distintos ángulos. Para ello, se irá variando la posición indicada en el transportador de ángulos y se comparará con el valor leído del sensor. El experimento se repetirá para separaciones de 2 y 4mm y los mismos casos para el imán desviado.

- Comportamiento dinámico.

Esta prueba permite observar el comportamiento del sensor con movimientos de distinta velocidad. Se pretende comprobar que las medidas se actualizan correctamente, proporcionando una señal suave. Esta prueba también se empleará para comparar el valor de velocidad angular del eje obtenido por derivación de la medida de ángulo con el obtenido por el giróscopo.

Para llevar a cabo las pruebas se ha desarrollado un equipo que permite el anclaje del sensor a un disco fijo enfrentado a un disco idéntico que permite rotación. Ambas piezas están montadas sobre un carril deslizante que permite ajustar la distancia existente entre imán y circuito integrado. A la plataforma móvil se atornilla un transportador de ángulos que permite conocer en todo momento el valor de ángulo real. También se encuentra conectado a dicho elemento el giróscopo MPU6050, que permitirá medir con precisión la velocidad angular del eje durante las pruebas.

Las ilustraciones 43 a 47 muestran diferentes detalles del montaje en cuestión.



Ilustración 43. Base giratoria del imán

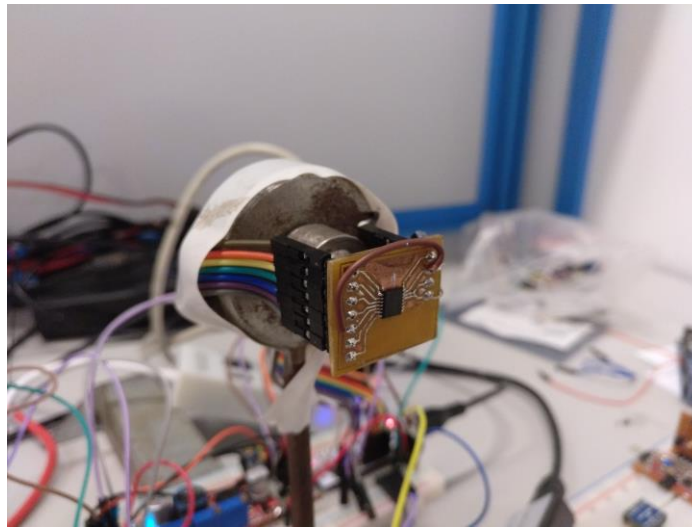


Ilustración 44. Base fija del sensor AS5047D

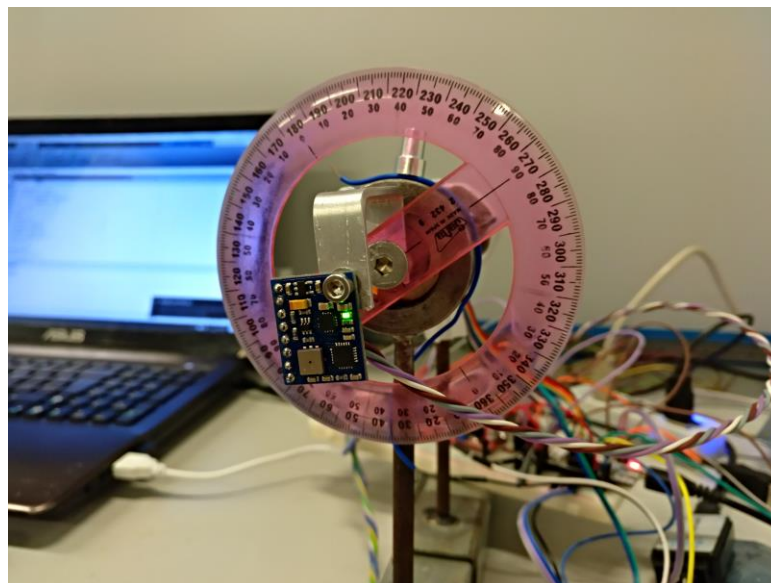


Ilustración 45. Vista frontal del banco de pruebas del AS5047D

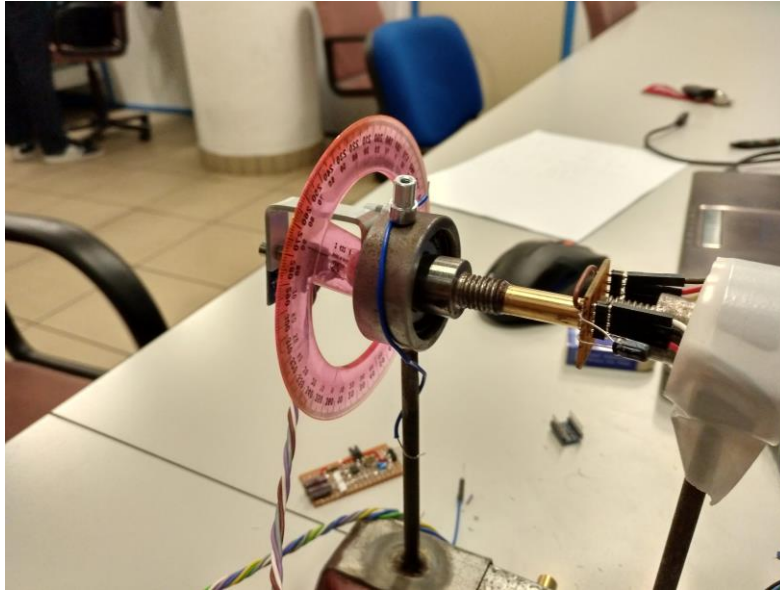


Ilustración 46. Vista lateral del banco de pruebas del AS5047D

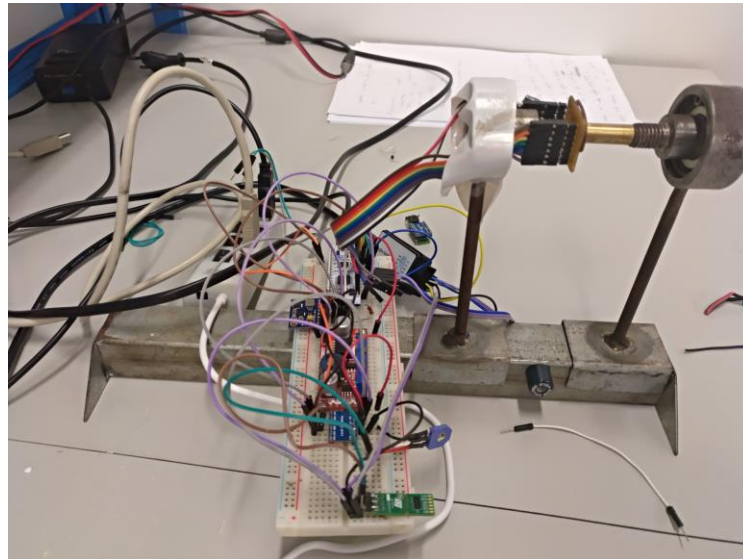


Ilustración 47. Vista general del banco de pruebas del AS5047D

5.2 Sensor ToF VL6180X

Para este sensor se pretenden poner a prueba los siguientes aspectos:

- Límites de medida.

Con este test se pretende averiguar los límites superior e inferior de medida del sensor, para ello se desplazará el objetivo sobre el banco de medida, desde 0 hasta 60cm y se capturarán los datos. El proceso se repetirá para todas las configuraciones de rango y con objetivos blanco reflectante y negro no reflectante.

- Exactitud de la media.

El objetivo de esta prueba es comparar la distancia real con la obtenida del sensor. Para ello se colocará el objetivo a una distancia conocida y se irá alejando a intervalos controlados:

- ❖ Para el rango de 0-200mm se tomarán datos a 20, 50, 100, 150, 170 y 200 mm

- ❖ Para el rango de 0-400mm se tomarán datos a 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 y 400 mm
- ❖ Para el rango de 0-600mm se tomarán datos a 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 450, 500, 550 y 600 mm

Estos experimentos se repetirán para objetivo claro reflectante y oscuro no reflectante.

- Característica de ruido estática.

Para comprobar la estabilidad de la medida y la posible existencia de ruido en un entorno sin interferencias, se mantendrá un objetivo fijo a una distancia conocida y se realizará una captura de los datos. Posteriormente se obtendrán los valores máximo, mínimo, medio y la desviación típica:

- ❖ Para una configuración de rango entre 0 y 200 mm se realizarán medidas a 100 mm y 190 mm con un objetivo claro reflectante y posteriormente con un objetivo oscuro no reflectante.
- ❖ Para una configuración de rango entre 0 y 400 mm se realizarán medidas a 190 mm y 390 mm con un objetivo claro reflectante y posteriormente con un objetivo oscuro no reflectante.
- ❖ Para una configuración de rango entre 0 y 600 mm se realizarán medidas a 290 mm y 550 mm con un objetivo claro reflectante y posteriormente con un objetivo oscuro no reflectante.
- Resistencia ante interferencia externas.

Con este experimento se pretende observar cómo afecta la luz a la estabilidad de la medida. Para ello se repetirán los experimentos de límite de medida y característica de ruido estática iluminando el escenario de prueba con una linterna led de alta potencia.

- Frecuencia de muestreo

Dado que la tasa de muestreo del sensor es altamente dependiente de las condiciones externas, durante todos los experimentos se analizará la tasa de muestreo.

Los experimentos se realizarán en un banco de pruebas fabricado con perfil de aluminio al que se acopla el sensor. Sobre este perfil, se deslizará el objetivo usado para medir su distancia. Junto al perfil de aluminio, se

encuentra una regla con la que controlar en todo momento la distancia real. En las figuras 48,49 y 50, se muestra el montaje en cuestión.

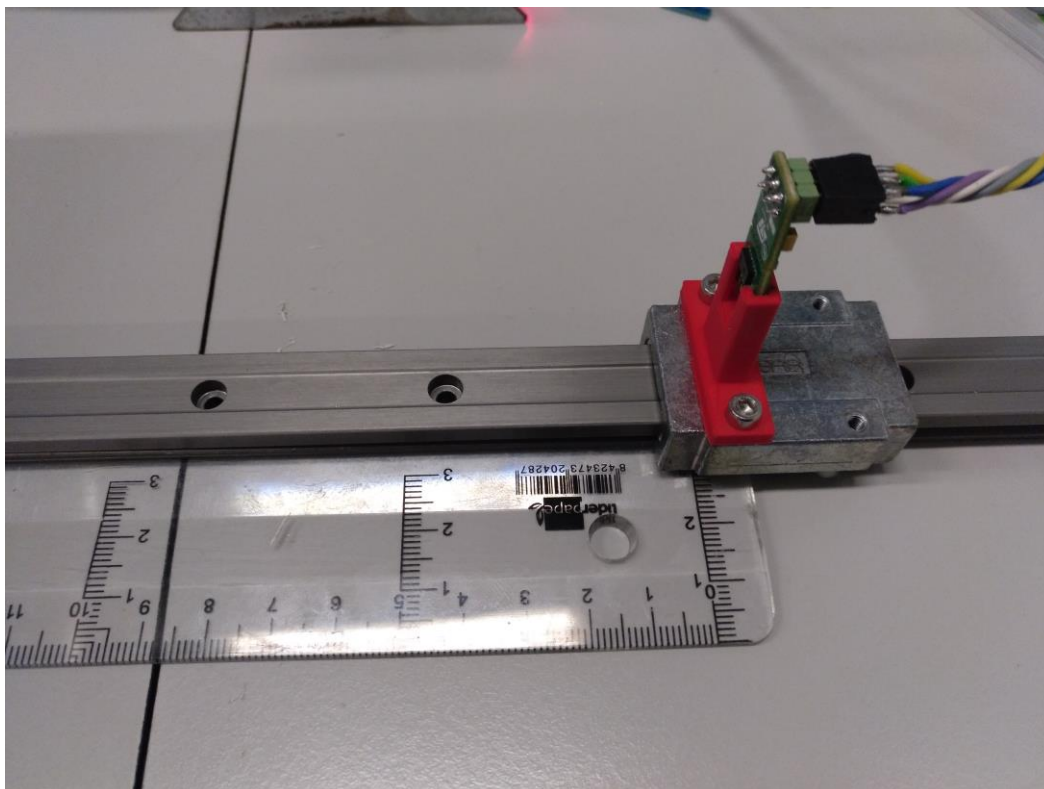


Ilustración 48. Vista lateral del banco de pruebas del VL6180X

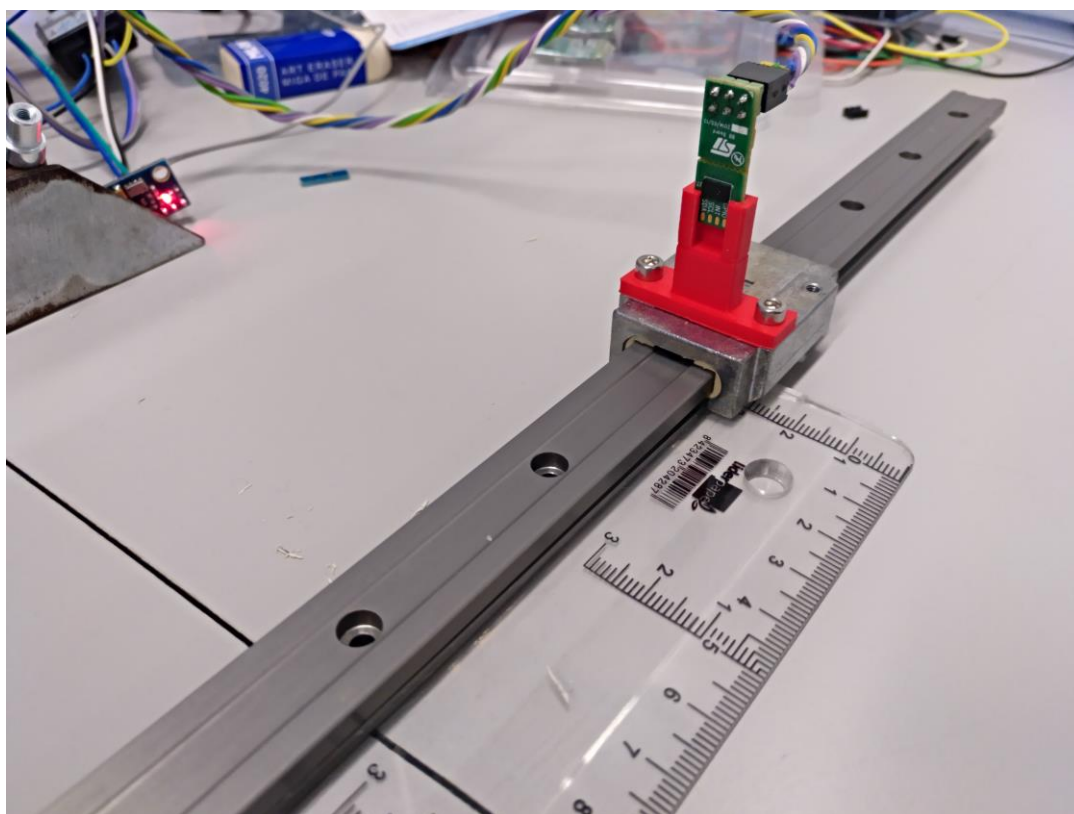


Ilustración 49. Vista frontal del banco de pruebas del VL6180X

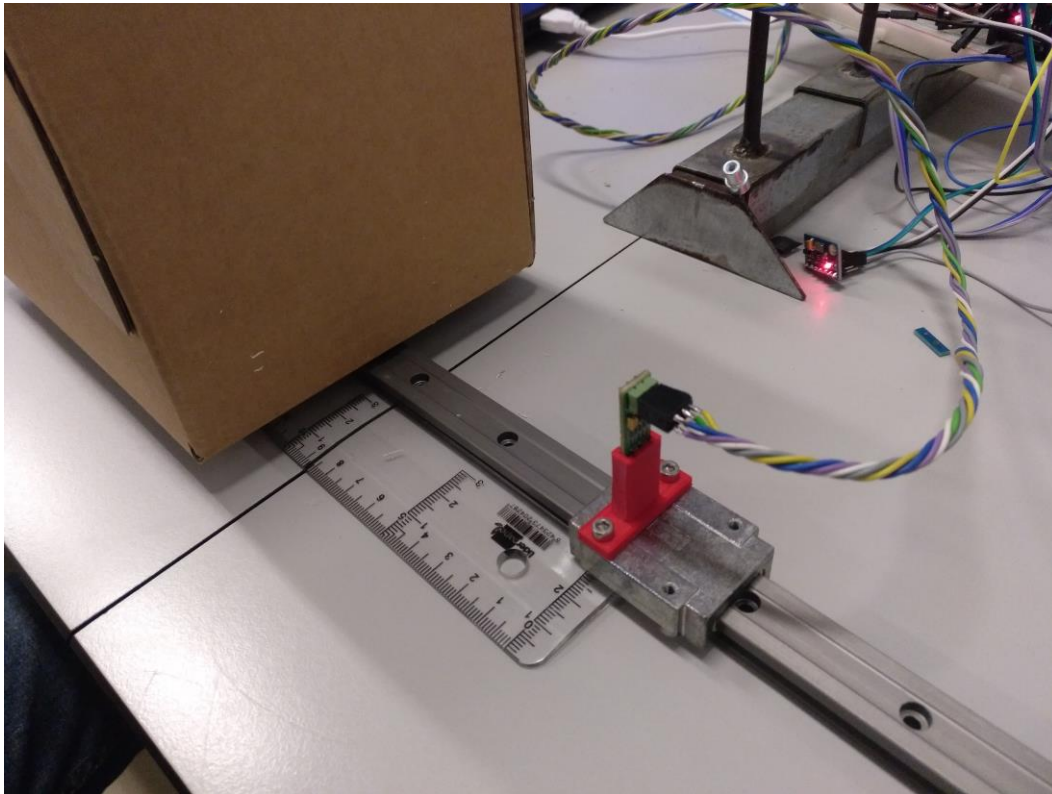


Ilustración 50. Objetivo oscuro no reflectante frente al sensor V6180X

6 RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos a partir de las pruebas descritas en el capítulo anterior, representados gráficamente o mediante tablas indicando los parámetros más relevantes de cada prueba. Para la representación de los datos se ha empleado el software MATLAB.

6.1 Encoder magnético AS5047D

A continuación, se exponen los resultados de las pruebas realizadas sobre el sensor de ángulo AS5047D del fabricante Austrian Microsystems. Las pruebas que se han realizado son:

- Característica de ruido estática, donde evaluaremos la estabilidad de la medida cuando el sensor se encuentra en reposo, sin movimiento y sin interferencias magnéticas externas.
- Test de resistencia a interferencias magnéticas externas, que nos indicará como responde el dispositivo ante la presencia de campos magnéticos distintos al del propio imán de medida
- Exactitud de la medida, cuyo fin es evaluar si la medida se corresponde con el valor real.
- Comportamiento dinámico, con el objetivo de evaluar cómo responde el sensor ante movimientos de distinta velocidad, simulando así las condiciones de trabajo reales.

6.1.1 Característica de ruido estática

El objetivo de esta prueba es determinar la presencia de ruido en la medida bajo condiciones ideales, es decir, sin movimiento y lejos de cualquier campo magnético que pueda interferir. Se probarán separaciones entre imán y sensor de 2 y 4 mm, así como desvíos del mismo con respecto al eje de giro de 2mm.

Los resultados con el imán a 2mm de separación se muestran en las ilustraciones 51 y 52 y las tablas 22 y 23. Una vez evaluados los datos, se concluye que la desviación del imán no tiene un efecto apreciable, manteniéndose en ambos casos la amplitud del ruido en torno a 0.3 grados. Al aumentar la distancia de separación hasta los 4mm los datos que se obtienen son los representados en las ilustraciones 53 y 54 y las tablas 24 y 25. Como puede apreciarse, tanto con el imán centrado como desviado el nivel de ruido aumenta con respecto al caso con separación de 2mm, aumentando la amplitud de este a 0.6 grados. El hecho de que el imán esté desviado tampoco tiene un efecto apreciable en este caso.

6.1.1.1 Imán centrado a 2mm de separación.

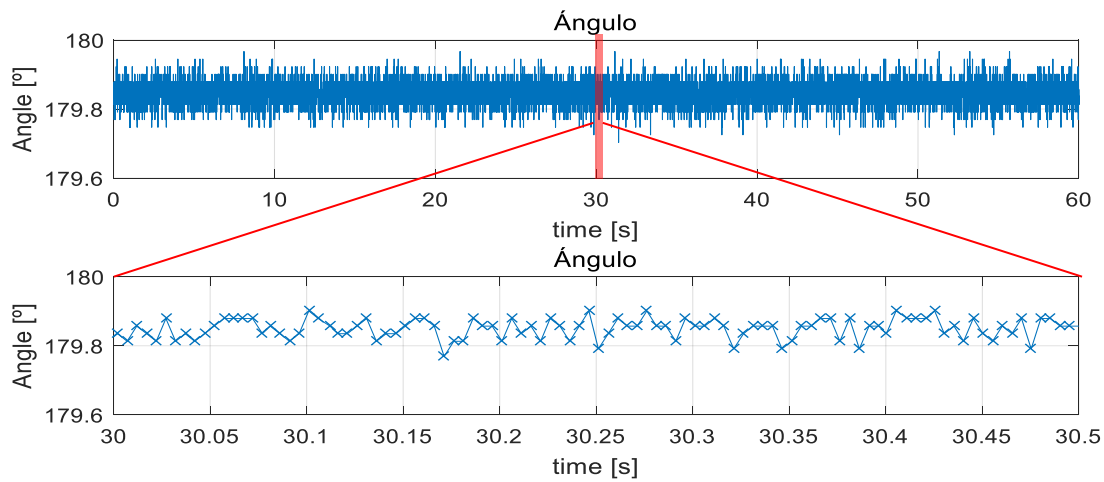


Ilustración 51. Medida estática 180° sin interferencia a 2mm

Tabla 22. Resultados medida estática 180° sin interferencia a 2mm.

Desviación típica	0.033
Máximo	179.967
Mínimo	179.703
Media	179.849

6.1.1.2 Imán desviado a 2mm de separación.

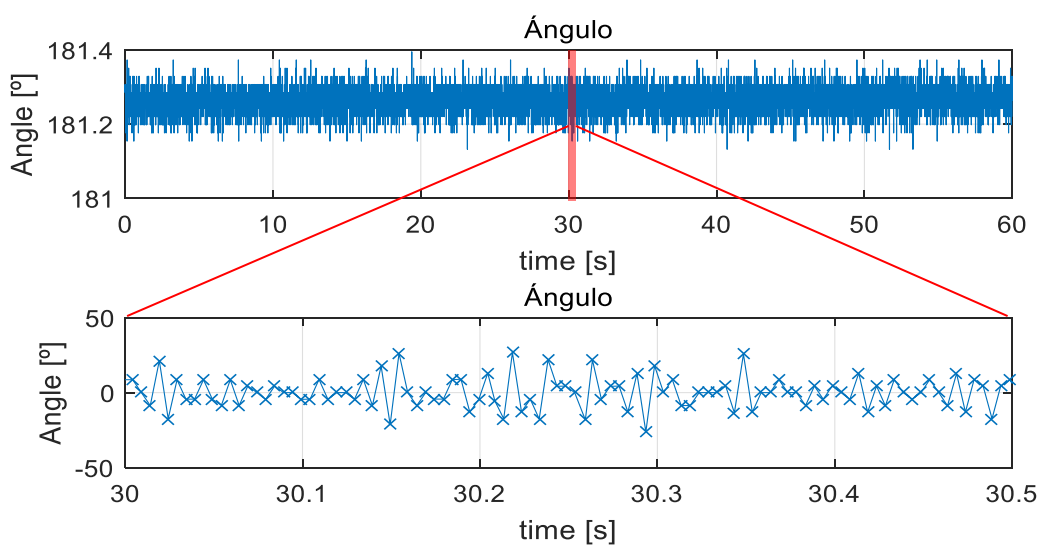


Ilustración 52. Medida estática 180° sin interferencia a 2mm descentrado

Tabla 23. Resultados medida estática 180° sin interferencia a 2mm descentrado

Desviación típica	0.0333
Máximo	181.417
Mínimo	181.110
Media	181.268

6.1.1.3 Imán centrado a 4mm de separación.

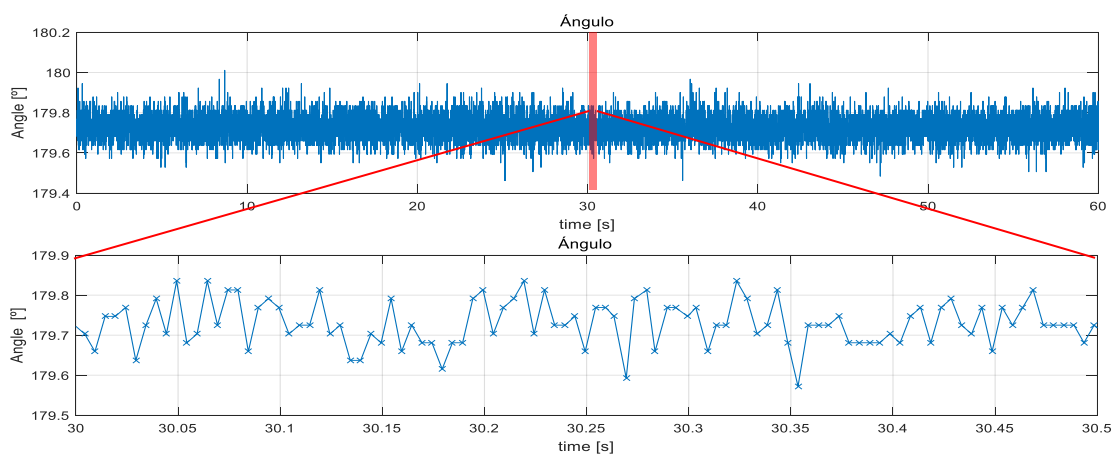


Ilustración 53. Medida estática 180° sin interferencia a 4mm

Tabla 24. Resultados medida estática 180° sin interferencia a 4mm

Desviación típica	0.0588
Máximo	180.011
Mínimo	179.418
Media	179.724

6.1.1.4 Imán descentrado a 4mm de separación.

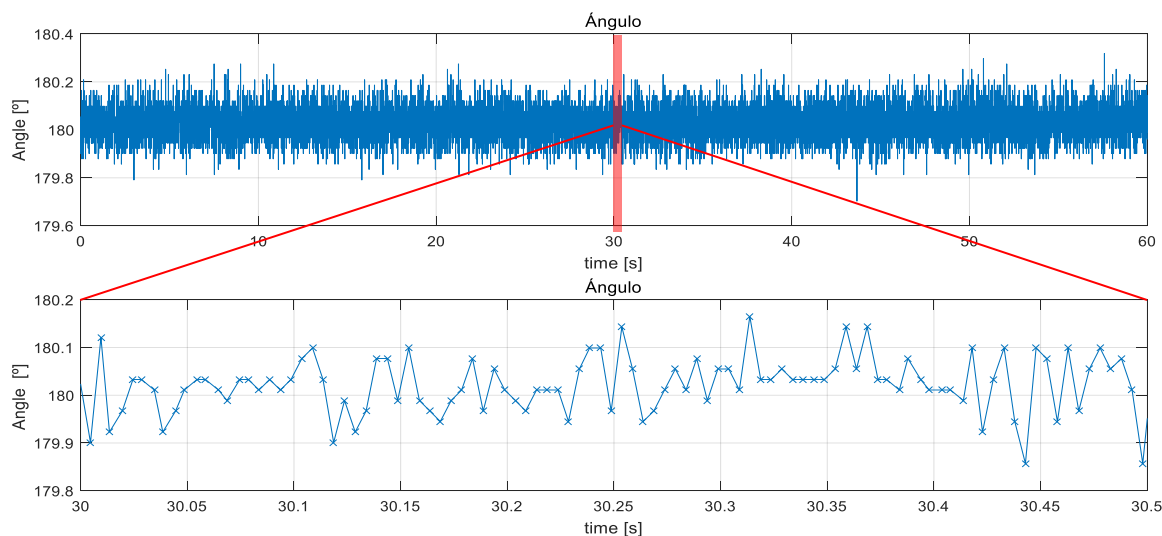


Ilustración 54. Medida estática 180° sin interferencia a 4mm descentrado.

Tabla 25. Resultados medida estática 180° sin interferencia a 4mm descentrado

Desviación típica	0.067
Máximo	180.319
Mínimo	179.703
Media	180.029

6.1.2 Resistencia a interferencias magnéticas externas

Esta prueba tiene como finalidad evaluar el comportamiento del sensor ante la presencia de campos magnéticos fuertes en las inmediaciones del sensor. Para ello se repetirá la misma batería de pruebas que en el caso anterior y durante la medida se acercará un imán externo al banco de pruebas al sensor, que será el encargado de generar la interferencia.

Con una separación de 2mm los resultados obtenidos son los expuestos en las ilustraciones 55 y 56, así como las tablas 26 y 27. Se observa cómo durante la prueba con el imán centrado, el campo magnético externo no tiene efecto apreciable sobre la medida, sin embargo, ocurre lo contrario cuando el imán no está alineado con el sensor, en este caso se producen desviaciones notables variables en amplitud por el efecto del campo externo.

Las ilustraciones 57 y 58 y las tablas 28 y 29 se corresponde con los resultados de la prueba con una separación entre imán y sensor de 4mm. En ambos casos se observan desviaciones notables, superiores a las del caso anterior, y más acentuadas aún en el caso del imán descentrado, llegando incluso a superar los 3 grados.

6.1.2.1 Imán centrado a 2mm de separación.

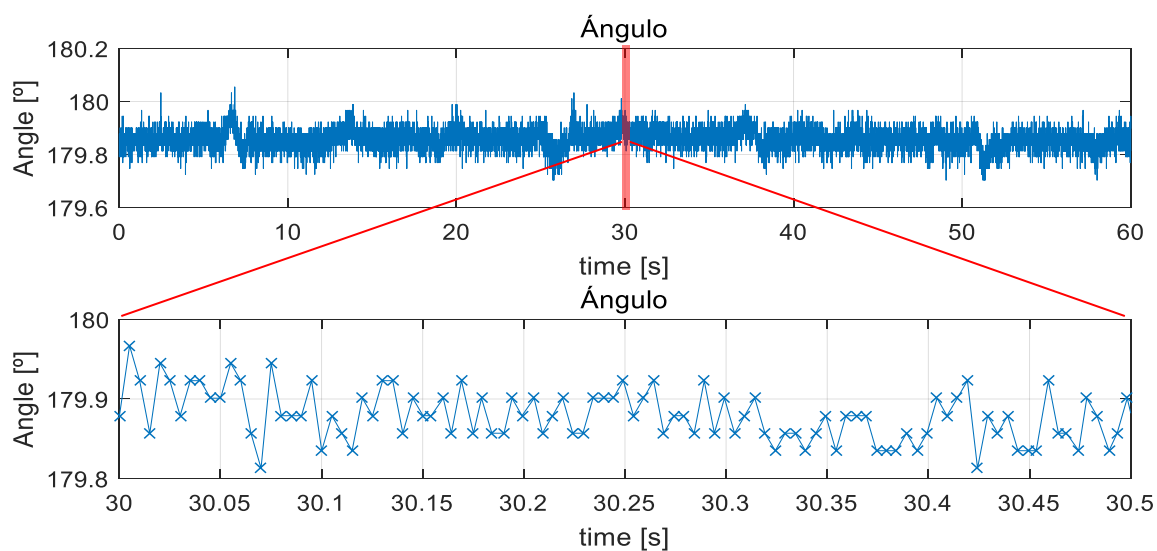


Ilustración 55. Medida estática 180° con interferencia a 2mm

Tabla 26. Resultados medida estática 180° con interferencia a 2mm

Desviación típica	0.0377
Máximo	180.055
Mínimo	179.703
Media	179.8589

6.1.2.2 Imán descentrado a 2mm de separación.

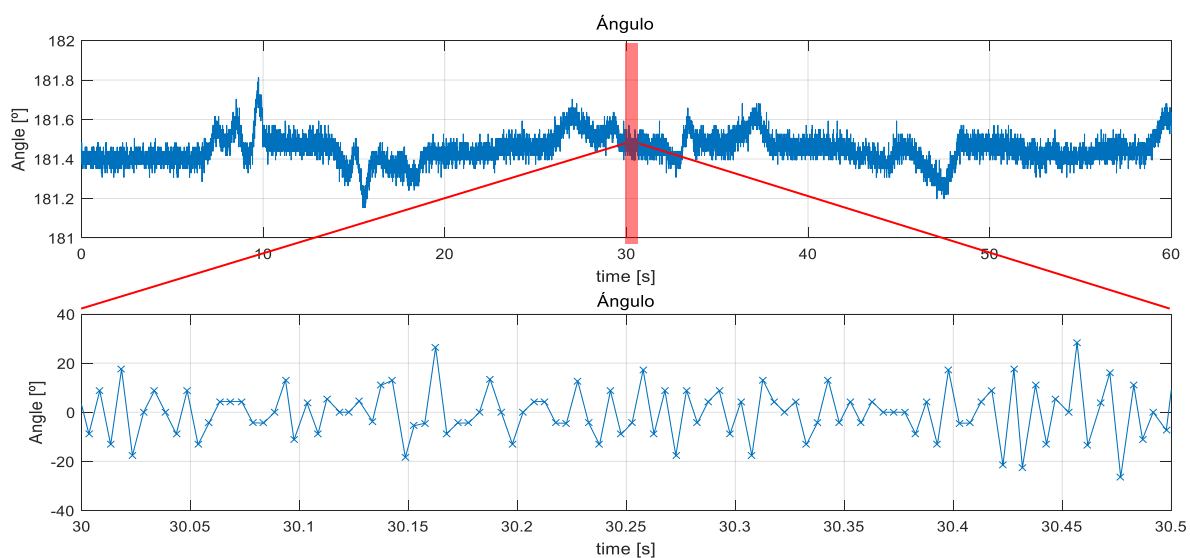


Ilustración 56. Medida estática 180° con interferencia a 2mm descentrado

Tabla 27. Resultados medida estática 180° con interferencia a 2mm descentrado

Desviación típica	0.0708
Máximo	181.813
Mínimo	181.154
Media	181.4557

6.1.2.3 Imán centrado a 4mm de separación.

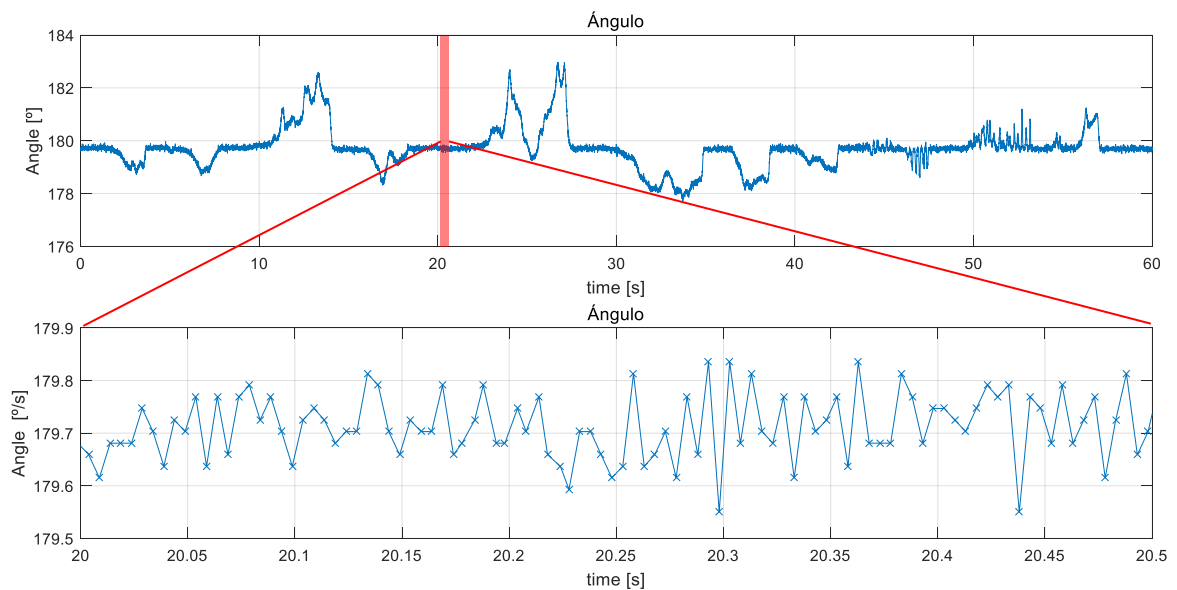


Ilustración 57. Medida estática 180° con interferencia a 4mm

Tabla 28. Resultados medida estática 180° con interferencia a 4mm

Desviación típica	0.7138
Máximo	182.956
Mínimo	177.726
Media	179.729

6.1.2.4 Imán descentrado a 4mm de separación.

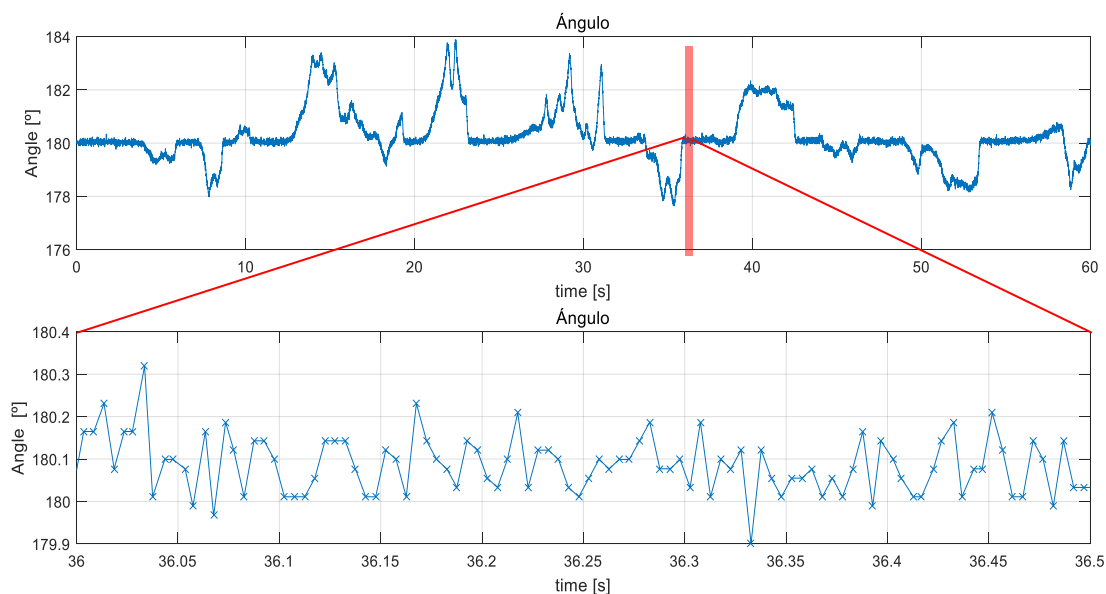


Ilustración 58. Medida estática 180° con interferencia a 4mm descentrado

Tabla 29. Resultados medida estática 180° con interferencia a 4mm descentrado

Desviación típica	0.8411
Máximo	183.878
Mínimo	177.638
Media	180.125

6.1.3 Exactitud de la medida

Esta prueba se realiza con el objetivo de averiguar la relación entre la medida real y la obtenida por el sensor.

El primer caso evaluado corresponde con una separación entre sensor e imán de 2mm, cuyos resultados se exponen en las ilustraciones 59 y 60 y las tablas 30 y 31. Con el imán centrado, la relación entre ángulo real y ángulo medido es muy elevada, las pequeñas diferencias observadas pueden achacarse a errores de fabricación y montaje del elemento tomado como referencia. Cuando analizamos el experimento con el imán descentrado, aparecen desviaciones notables, que llegan a superar los 7 grados.

En la siguiente prueba se aumenta la distancia de separación hasta los 4mm y se repite el proceso, obteniendo así los resultados que se aprecian en las ilustraciones 61 y 62 y las tablas 32 y 33. Cuando el imán está centrado, por lo general existe una buena correspondencia entre el ángulo real y la obtenida del sensor, a excepción de algunas medidas, en las que hay una desviación del orden de 3 grados. Esta desviación aumenta considerablemente cuando el imán no está centrado, llegando a superar los 22 grados de diferencia.

6.1.3.1 Imán centrado a 2mm de separación.

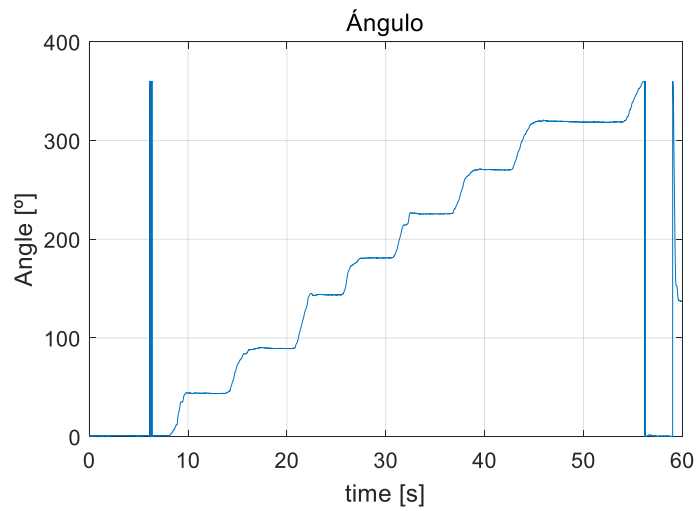


Ilustración 59. Medidas 0 a 360 imán a 2mm centrado

Tabla 30. Resultados medidas 0 a 360 imán a 2mm centrado

Valor Real	Valor Medido
0	0.82
45	44.05
90	89.32
145	144.04
180	180.47
225	225.68
270	270.33
315	318.65
360	359.47

6.1.3.2 Imán descentrado a 2mm de separación.

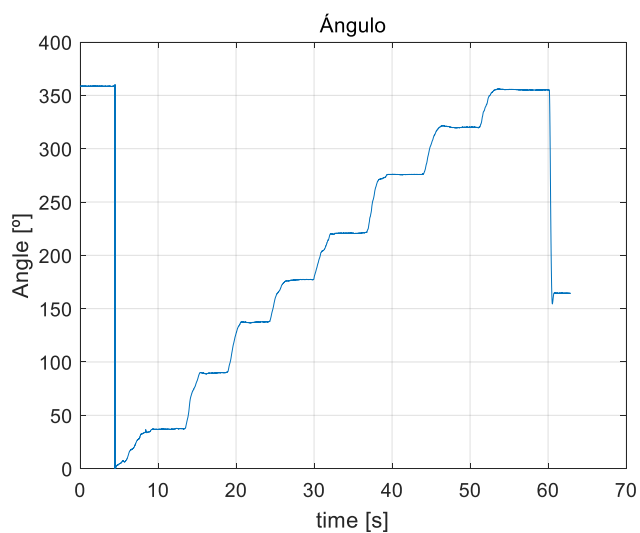


Ilustración 60. Medidas 0 a 360 imán descentrado

Tabla 31. Resultados medidas 0 a 360 imán a 2mm descentrado

Valor Real	Valor Medido
0	-1.43
45	37.44
90	89.91
135	137.53
180	177.25
225	220.53
270	275.80
315	319.84
360	355.04

6.1.3.3 Imán centrado a 4mm de separación.

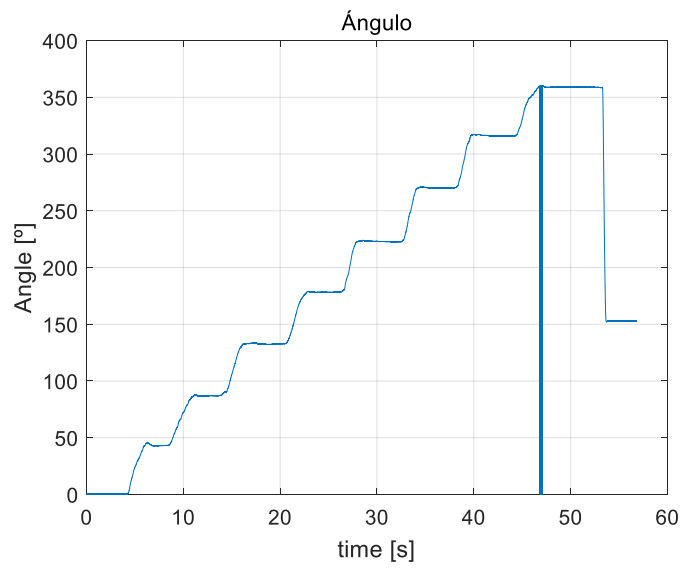


Ilustración 61. Medidas 0 a 360 imán a 4mm centrado

Tabla 32. Resultados medidas 0 a 360 imán a 4mm centrado

Valor Real	Valor Medido
0	0.41
45	43.22
90	87.28
135	132.18
180	178.62
225	222.90
270	270.00
315	316.86
360	358.89

6.1.3.4 Imán descentrado a 4mm de separación.

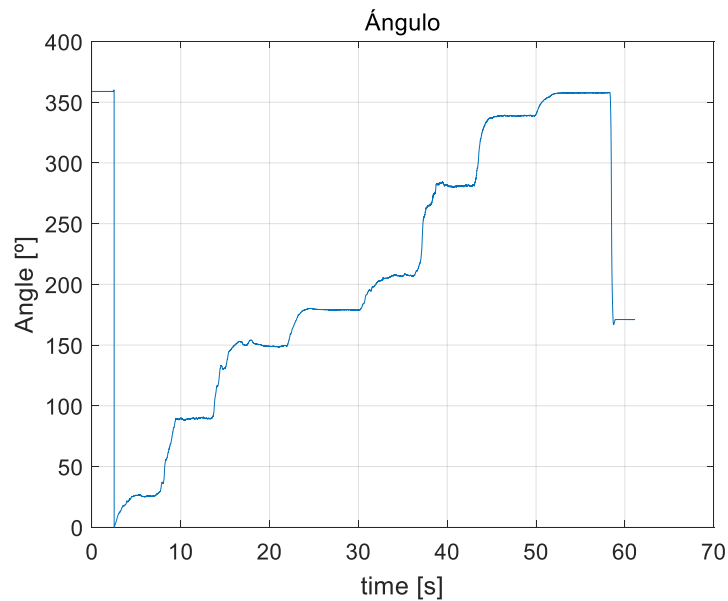


Ilustración 62. Medidas 0 a 360 imán a 4mm descentrado

Tabla 33. Resultados medidas 0 a 360 imán a 4mm descentrado

Valor Real	Valor Medido
0	-1.15
45	26.63
90	89.50
135	150.72
180	179.19
225	206.88
270	282.34
315	337.00
360	357.64

6.1.4 Comportamiento dinámico.

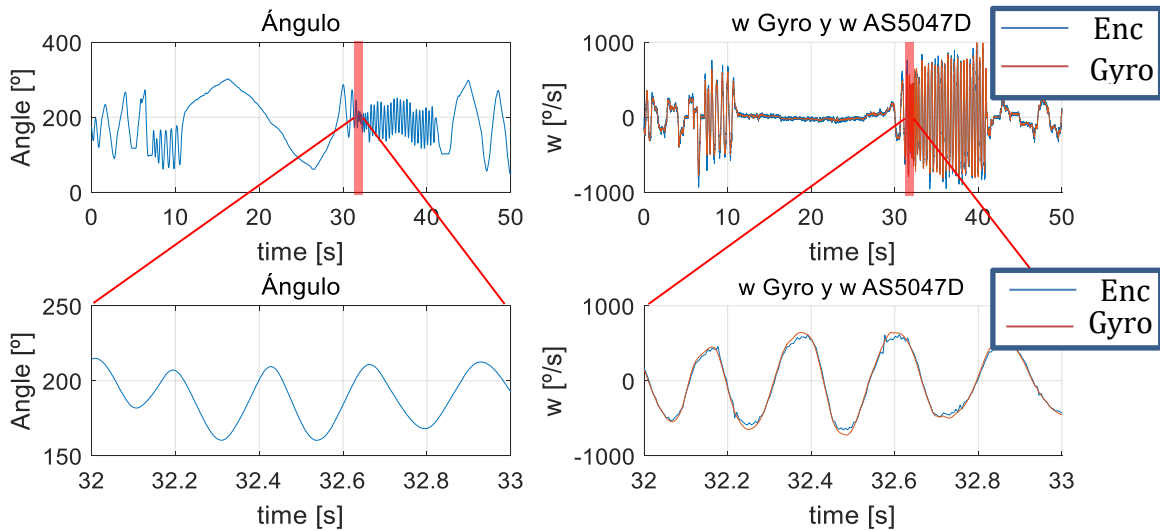
Con esta prueba se pretende evaluar cómo se comporta el sensor ante distintas velocidades de giro y cambios de velocidad angular. Servirá también para validar su uso en la obtención la velocidad angular a partir de la derivación de la medida de ángulo.

Las pruebas realizadas con una separación de 2mm entre imán y sensor quedan representadas con las ilustraciones 63 y 64. En ambos casos la medida de ángulo es suave tanto a velocidades bajas como altas. Con el imán centrado el valor de velocidad angular obtenido por derivación tiene un alto grado de coincidencia con

el obtenido con el gir6scopo MPU6050, sin embargo, cuando la alineaci6n entre im6n y sensor no es la adecuada la velocidad angular estimada presenta errores a bajas velocidades.

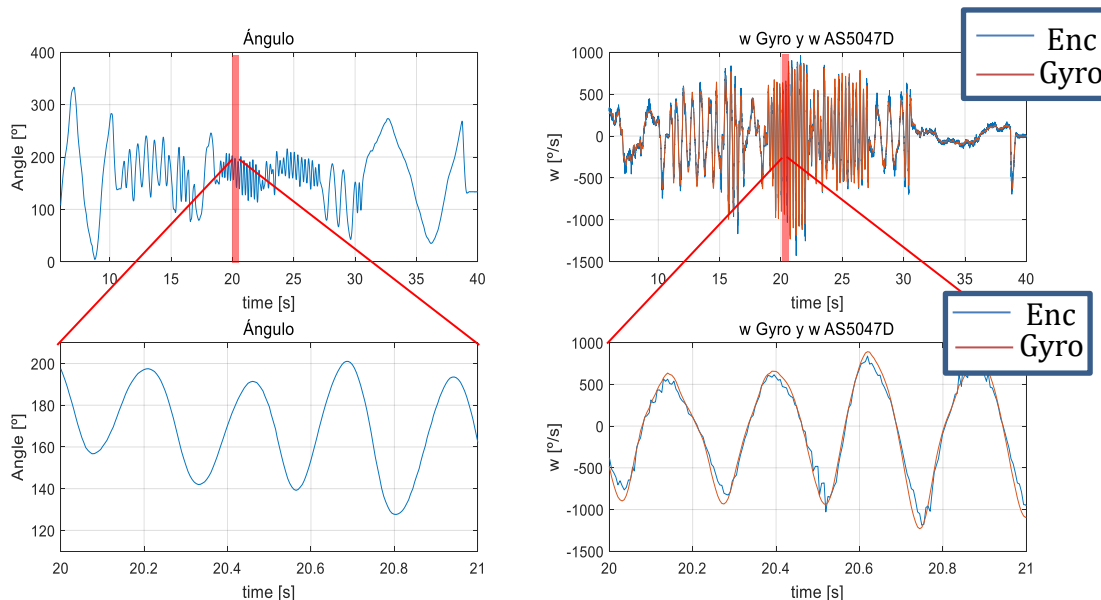
Cuando se aumenta la distancia de separaci6n hasta los 4mm se obtienen los datos representados en las im6genes 65 y 66. El incremento en el ruido hace que la medida de velocidad angular por derivaci6n presente oscilaciones notables a bajas velocidades, siendo este m6s acusado y presente en todo el rango de velocidades cuando el im6n no est6 alineado. La medida de 6ngulo sigue siendo en t6rminos generales, suave.

6.1.4.1 Im6n centrado a 2mm de separaci6n.



Ilustraci6n 63. Comportamiento din6mico con im6n a 2mm

6.1.4.2 Im6n descentrado a 2mm de separaci6n.



Ilustraci6n 64. Comportamiento din6mico con im6n a 2mm descentrado

6.1.4.3 Imán centrado a 4mm de separación.

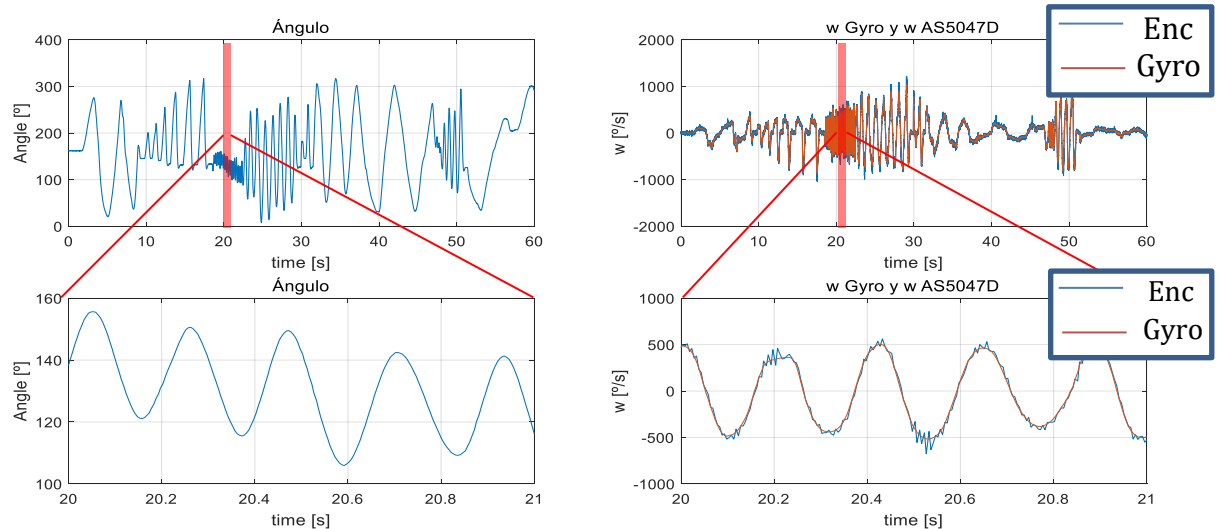


Ilustración 65. Comportamiento dinámico con imán a 4mm

6.1.4.4 Imán descentrado a 4mm de separación.

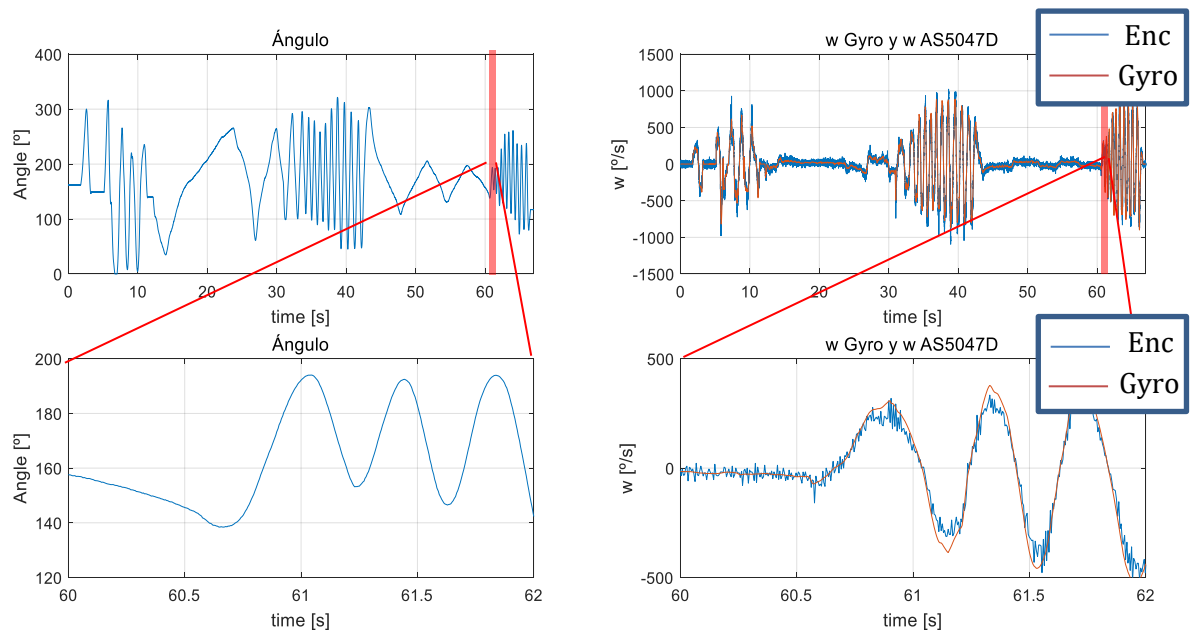


Ilustración 66. Comportamiento dinámico con imán a 4mm descentrado

6.2 Sensor ToF VL6180X

A continuación, se exponen los resultados de los tests realizados sobre el sensor de rango por tiempo de vuelo VL6180X del fabricante ST Microelectronics. Se han realizado tres tipos de pruebas:

- Rango de operación, donde se determinará la distancia máxima y mínima en diferentes condiciones.
- Exactitud de la medida, evaluando el grado de correspondencia entre medida real y obtenida por el sensor, nivel de ruido y la velocidad de lectura según la distancia.

- Respuesta a interferencia y ruido evaluada en diferentes configuraciones.

6.2.1 Rango de operación

El objetivo de esta prueba es determinar el rango de operación real del dispositivo en todas sus configuraciones, utilizando objetivos de reflectancia variable y ante la presencia de interferencias externas en forma de una fuente de luz blanca artificial (LED). A continuación, se representará la señal medida y la tasa de muestreo del sensor considerando objetivos con un nivel de reflectancia variable y la presencia o no de interferencias externas. En primer lugar, se comparará la respuesta del sensor en el rango 0 – 200 mm. Observando las Ilustraciones 67 y 68, así como las tablas 34 y 35 se puede apreciar cómo tanto el cambio de reflectancia del objetivo como la presencia de luz externa no influye en los resultados obtenidos, obteniéndose el mismo rango de operación y frecuencia de muestreo en ambos casos.

A continuación, se extendió el rango de medida hasta 400 mm, evaluando de nuevo los dos tipos de objetivos. Como se ve en las Ilustraciones 69 y 70 y las tablas 36 y 37, los resultados obtenidos en ambos objetivos son similares, con excepción del caso en el que se utiliza el objetivo oscuro en presencia de luz, donde esta hace que la distancia mínima medible aumente hasta los 32mm.

Durante el último caso se eleva el rango de medida hasta los 600 mm, obteniéndose los resultados expuestos en las ilustraciones 71 y 72 y las tablas 38 y 39. Cuando se trata de medir la distancia un objetivo oscuro, el rango máximo permanece constante con y sin fuente de luz externa, sin embargo, cuando esta está presente, la distancia mínima medible aumenta hasta los 30mm. Si el objetivo a medir es de color claro reflectante la distancia de mínima medible aumenta hasta los 32mm o incluso 160mm en algunos instantes.

6.2.1.1. Configuración 0-200 mm. Objetivo oscuro

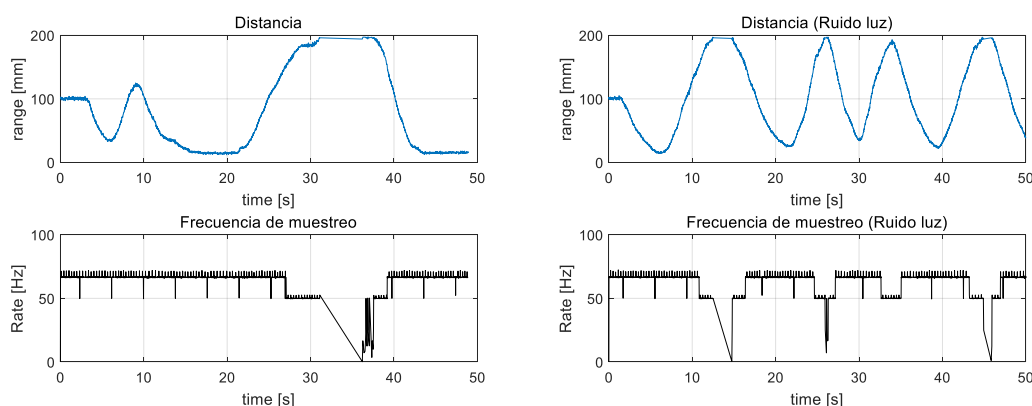


Ilustración 67. Límites de medida para rango 0-200mm objetivo oscuro.

Tabla 34. Límites de medida para rango 0–200mm objetivo oscuro.

	Sin ruido	Con ruido	Frecuencia
Distancia Máxima	197	197	-
Distancia Mínima	12	14	66

6.2.1.2. Configuración 0-200 mm. Objetivo claro

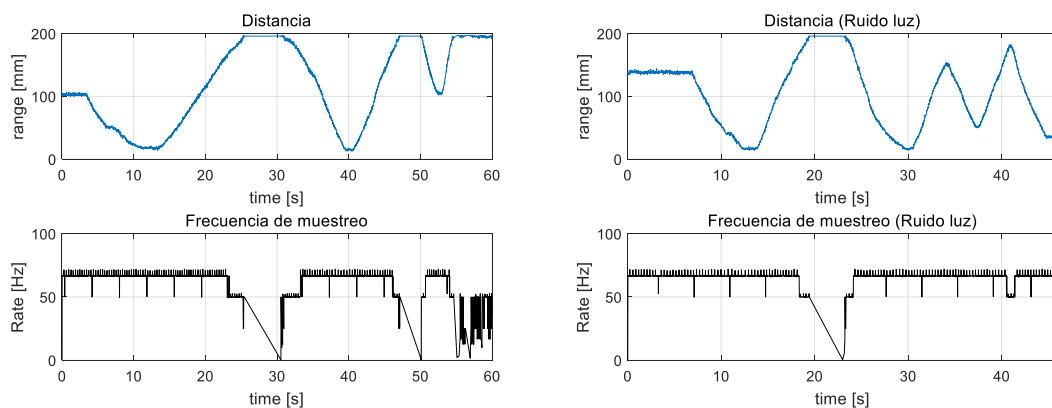


Ilustración 68. Límites de medida para rango 0-200mm objetivo claro.

Tabla 35. Límites de medida para rango 0-200mm objetivo claro.

	Sin ruido	Con ruido	Frecuencia
Distancia Máxima	197	197	-
Distancia Mínima	13	14	66

6.2.1.3. Configuración 0-400 mm. Objetivo oscuro.

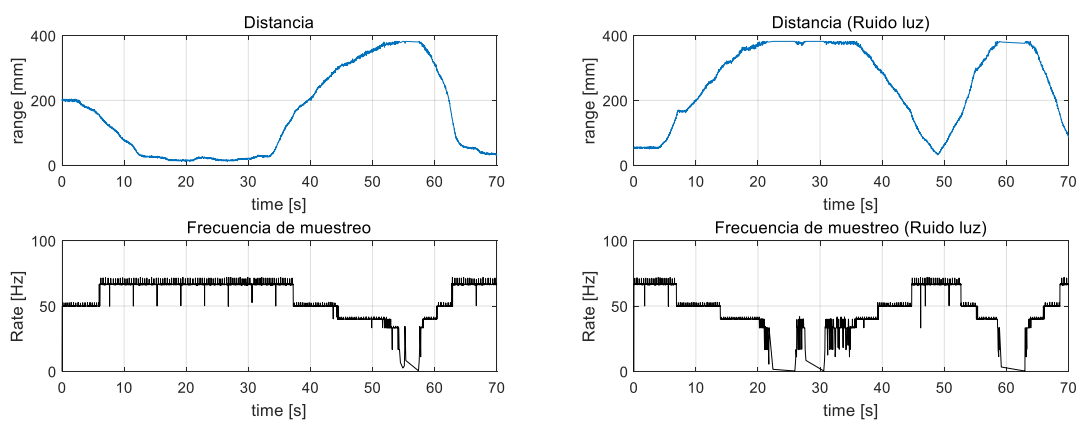


Ilustración 69. Límites de medida para rango 0-400mm objetivo oscuro.

Tabla 36. Límites de medida para rango 0-400mm objetivo oscuro.

	Sin ruido	Con ruido	Frecuencia
Distancia Máxima	382	382	-

Distancia Mínima	12	32	66
------------------	----	----	----

6.2.1.4. Configuración 0-400 mm. Objetivo claro.

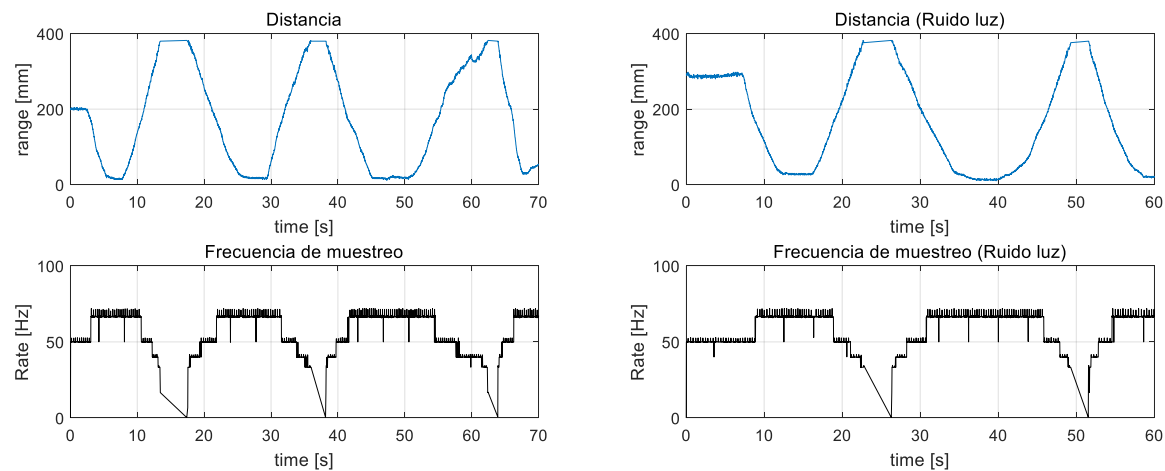


Ilustración 70. Límites de medida para rango 0-400mm objetivo claro.

Tabla 37. Límites de medida para rango 0-400mm objetivo claro.

	Sin ruido	Con ruido	Frecuencia
Distancia Máxima	382	382	-
Distancia Mínima	12	10	66

6.2.1.5. Configuración 0-600 mm. Objetivo oscuro.

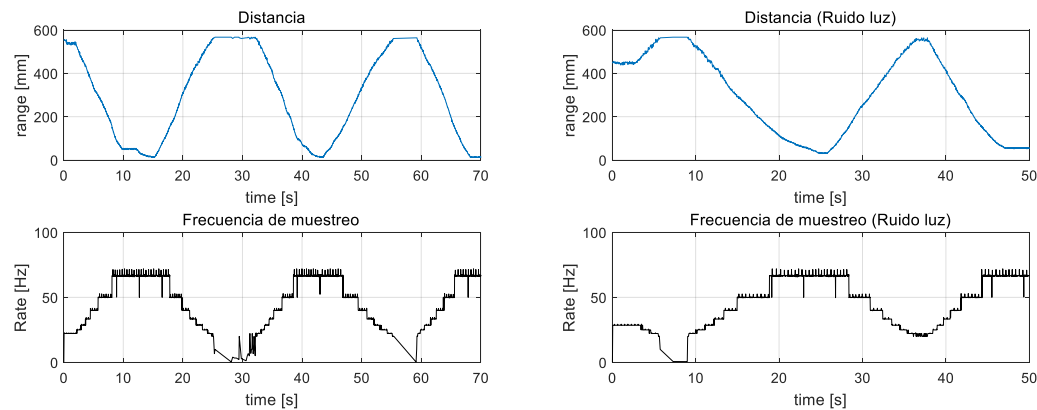


Ilustración 71. Límites de medida para rango 0-600mm objetivo oscuro.

Tabla 38. Límites de medida para rango 0-600mm objetivo oscuro.

	Sin ruido	Con ruido	Frecuencia
Distancia Máxima	567	567	-

Distancia Mínima	12	30	66
------------------	----	----	----

6.2.1.6. Configuración 0-600 mm. Objetivo claro.

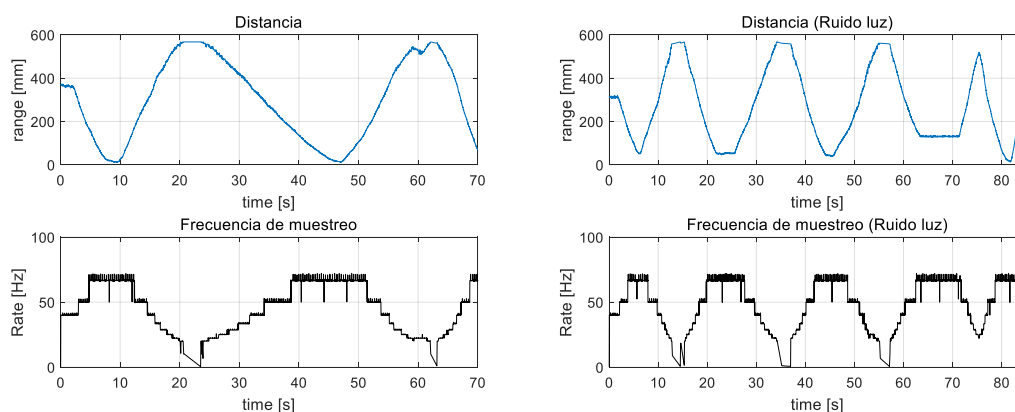


Ilustración 72. Límites de medida para rango 0-600mm objetivo claro.

Tabla 39. Límites de medida para rango 0-600mm objetivo claro.

	Sin ruido	Con ruido	Frecuencia
Distancia Máxima	567	567	-
Distancia Mínima	12	32/160	66

6.2.2 Exactitud de la medida

El objetivo de esta prueba es comprobar la relación que existe entre la medida real y la obtenida por el sensor en todas sus configuraciones de rango, para ello se irán colocando los objetivos a distancias conocidas con respecto al sensor. Esta prueba se realizará sobre los mismos objetivos de reflectancia variable que el caso anterior.

En primer lugar, se comprarán las medidas obtenidas con una configuración de rango de 0-200mm. Comparando las ilustraciones 73 y 74 así como las tablas 40 y 41, se aprecia como la precisión de la medida en ambos casos es correcta, sin embargo, la frecuencia de muestreo del dispositivo se ve afectada con el cambio de objetivo, reduciéndose hasta los 50Hz en los últimos tramos del experimento, llegando incluso a devolver errores a la distancia máxima.

A continuación, se ha aplicado la configuración de rango 0-400mm, evaluando de nuevo los mismos objetivos que en el caso anterior. Los resultados obtenidos en este caso se muestran en las ilustraciones 75 y 76 y en las tablas 42 y 43. La medida realizada con el objetivo claro presenta una diferencia que varía de 2 a 3mm con respecto a la real en todo el experimento, al igual que cuando se utiliza el objetivo oscuro. El mayor de los problemas se presenta en lo referente a la frecuencia de muestreo, el dispositivo se encuentra con serias dificultades a la hora de tomar muestras cuando se ha alcanzado el rango máximo.

El último caso corresponde a una configuración de rango de 0-600mm y sus resultados se exponen en las ilustraciones 77 y 78 y las tablas 44 y 45. Durante este experimento no ha habido diferencias en la tasa de

muestreo entre ambos objetivos, el mayor de los problemas aparece en la precisión de la medida, existiendo en ambos casos diferencias notables entre el valor real de distancia y el obtenido por el sensor, con diferencias que llegan a superar los 19mm en al caso del objetivo claro.

6.2.2.1. Configuración 0-200 mm.

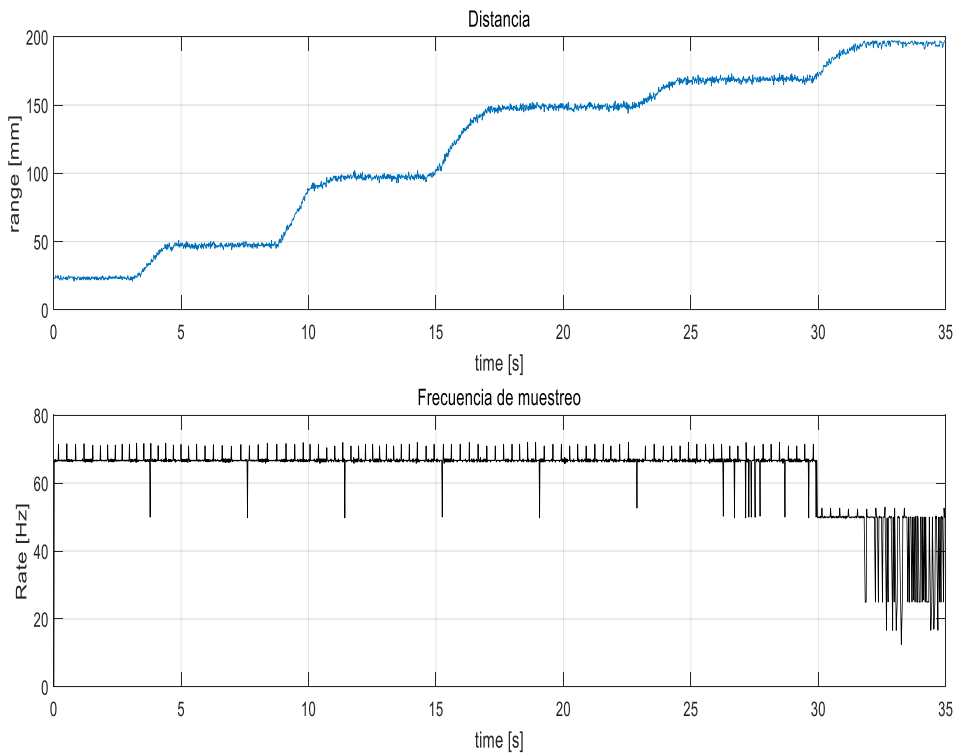


Ilustración 73. Exactitud de la medida 0-200mm objetivo oscuro

Tabla 40. Exactitud de la medida 0-200mm objetivo oscuro

Valor Real	Valor Medido	Muestreo
20	23.35	66
50	47.10	66
100	97.10	66
150	148.80	66
170	168.18	66
200	195.53	50-25

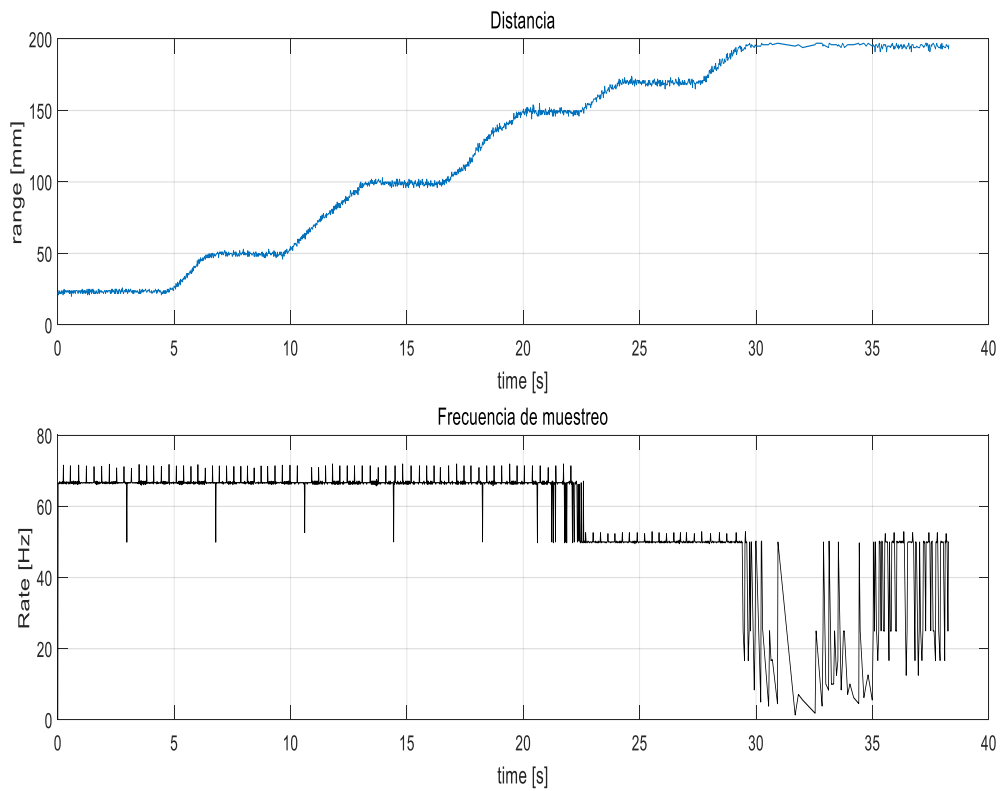


Ilustración 74. Exactitud de la medida 0-200mm objetivo claro.

Tabla 41. Exactitud de la medida 0-200mm objetivo claro

Valor Real	Valor Medido	Muestreo
20	23.00	66
50	49.58	66
100	98.53	66
150	148.80	66-50
170	168.18	50
200	195.53-Error	50-Error

6.2.2.2 Configuración 0-400 mm.

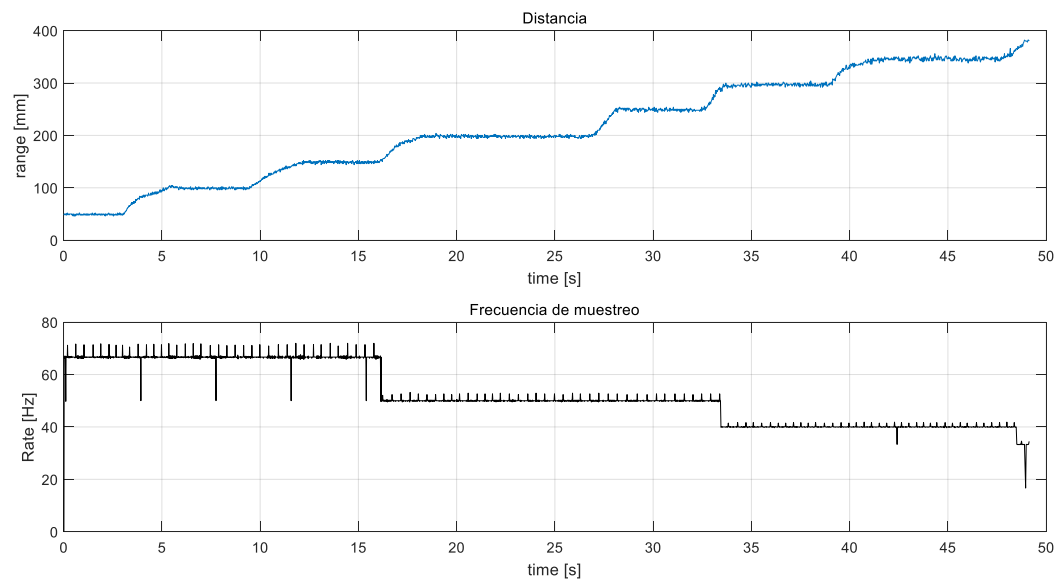


Ilustración 75. Exactitud de la medida 0-400mm objetivo oscuro.

Tabla 42. Exactitud de la medida 0-400mm objetivo oscuro

Valor Real	Valor Medido	Muestreo
50	49.20	66
100	99.10	66
150	148.70	66
200	198.60	66
250	249.00	50
300	294.70	40
350	347.15	40
400	Error	Error

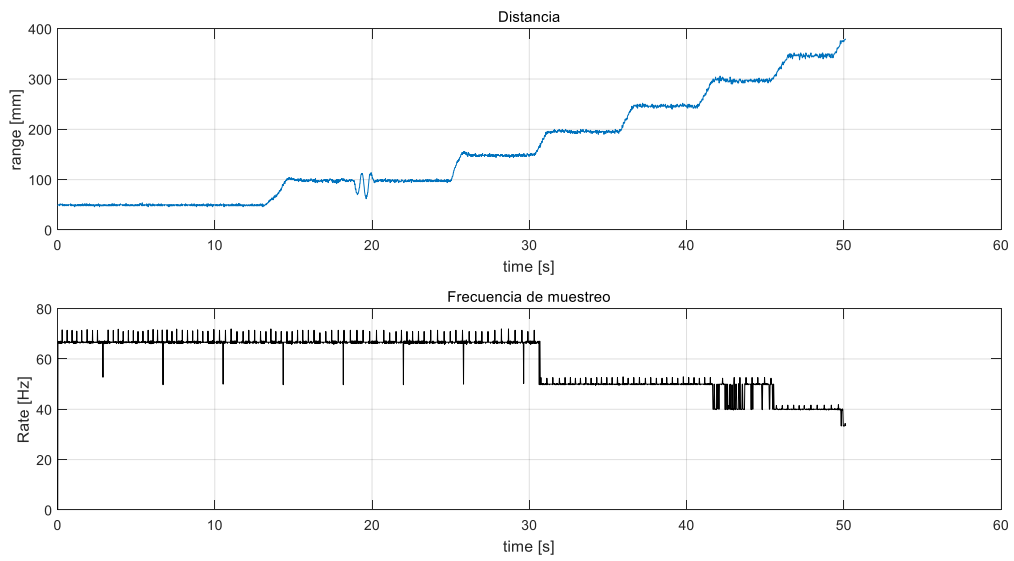


Ilustración 76. Exactitud de la medida 0-400mm objetivo claro.

Tabla 43. Exactitud de la medida 0-400mm objetivo claro.

Valor Real	Valor Medido	Muestreo
50	49.8	66
100	98.85	66
150	151.00	66
200	195.00	66
250	246.95	50
300	299.15	50-40
350	346.55	40
400	Error	Error

6.2.2.3 Configuración 0-600 mm.

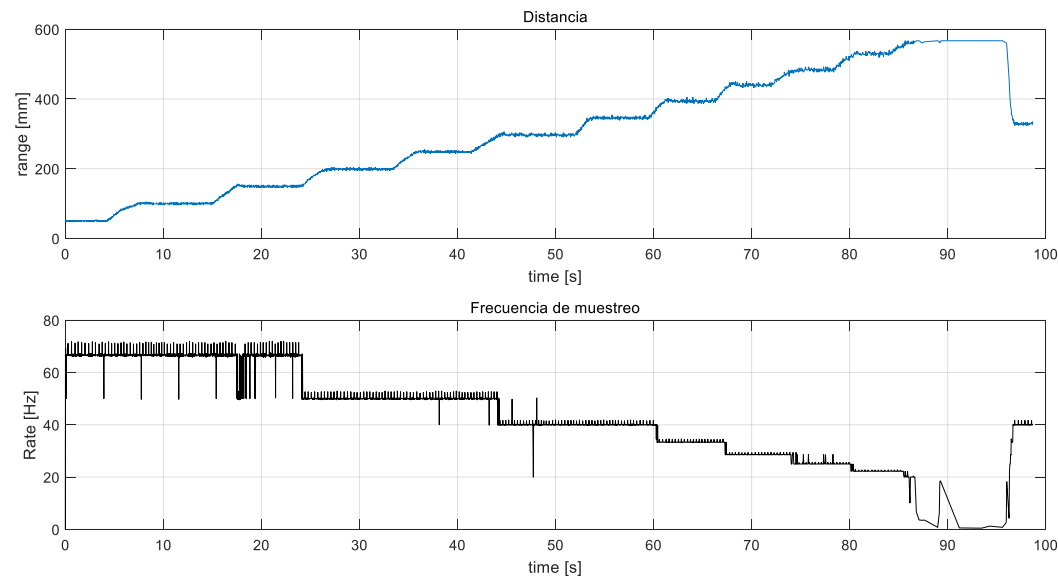


Ilustración 77. Exactitud de la medida 0-600mm objetivo oscuro

Tabla 44. Exactitud de la medida 0-600mm objetivo oscuro

Valor Real	Valor Medido	Muestreo
50	50.25	66
100	100.88	66
150	151.65	66
200	199.35	50
250	248.85	50
300	297.30	40
350	346.43	40
400	394.50	33
450	441.90	28
500	483.68	25
550	530.48	22
600	Error	Error

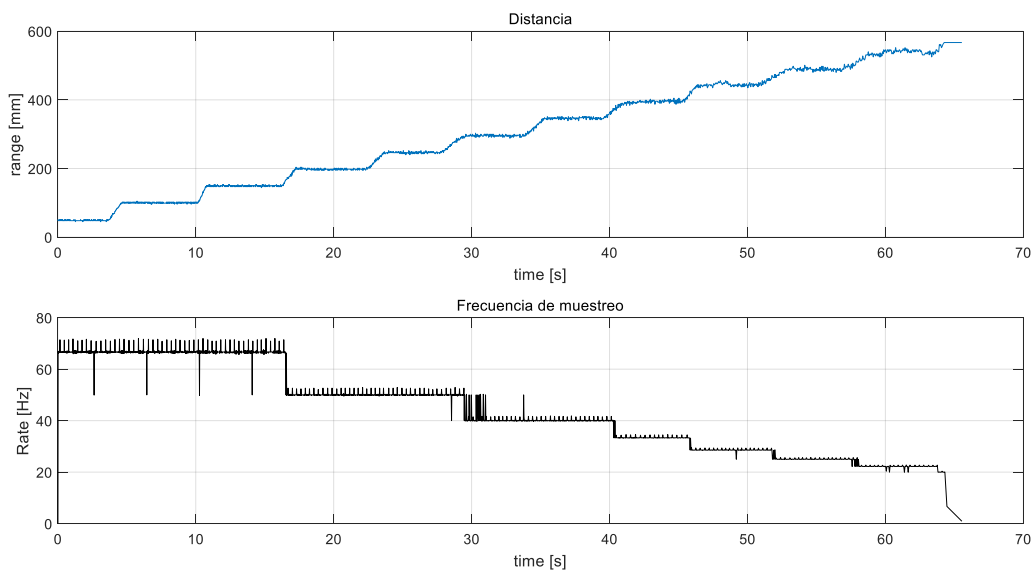


Ilustración 78. Exactitud de la medida 0-600mm objetivo claro.

Tabla 45. Exactitud de la medida 0-600mm objetivo claro.

Valor Real	Valor Medido	Muestreo
50	48.83	66
100	100.80	66
150	148.88	66
200	199.58	50
250	246.38	50
300	296.48	40
350	346.20	40
400	392.78	33
450	447.30	28
500	489.23	25
550	543.80	22
600	Error	Error

6.2.3 Característica de ruido estática y resistencia a interferencias externas.

Esta prueba tiene una doble finalidad, por un lado, averiguar, cuán estable es la medida cuando la distancia entre sensor y objetivo permanece constante y por otro ver cómo afecta la luz externa en el proceso de medida. Durante el desarrollo de este test se emplearán los mismos objetivos claro y oscuro usados en los anteriores casos colocados a la distancia máxima de medida y a la distancia media para cada una de las configuraciones de rango,

posteriormente se tomará una captura de datos con y sin la presencia de luz externa.

En primer lugar, se realiza el experimento con la configuración de rango 0-200mm con una distancia de separación entre objetivo y sensor de 100mm. Las ilustraciones 79 y 80 así como las tablas 46 y 47 muestran los resultados obtenidos con los objetivos oscuro y claro respectivamente. Una vez analizados los resultados, puede deducirse que no existen diferencias entre ambos objetivos, incluso ante la presencia de luz externa, sin embargo, la medida sufre de un ruido importante, que llega hasta los 10mm entre el valor máximo y mínimo. En el siguiente caso, se mantiene la configuración de rango, pero se aumenta la distancia a medir hasta los 190mm. Los resultados de esta prueba se muestran en las ilustraciones 81 y 82 y en las tablas 48 y 49. Al igual que en el caso anterior, existe una gran variación entre los valores máximo y mínimo obtenidos en ambos objetivos. El efecto de la luz externa se hace especialmente evidente cuando se emplea el objetivo claro reflectante, provocando importantes fluctuaciones en la medida.

La siguiente configuración de rango en poner a prueba es la de 0-400mm. Al igual que en el proceso anterior, en primer lugar, se mide la distancia al objetivo colocándolo a la distancia media, 200mm en este caso. Los resultados obtenidos se exponen en las ilustraciones 83 y 84 así como en las tablas 50 y 51. Puede observarse como, al igual que en el caso anterior, el ruido tiene una aportación considerable en ambos objetivos, sin embargo, la luz externa parece no tener efecto en ninguno de los casos. Para el siguiente experimento con esta configuración, se aumenta la distancia de medida hasta los 390mm. Los resultados en este caso se muestran en las ilustraciones 85 y 86 y las tablas 52 y 53. Con el aumento de la distancia, la amplitud del ruido crece independientemente de que objetivo se haya usado, además, al igual que ocurre en el test con el rango configurado a 0-200mm y con una distancia de 190mm, la luz externa tiene un efecto notable cuando se emplea el objetivo claro reflectante.

La configuración 0-600mm es la última en poner a prueba. Las ilustraciones 87 y 88 y las tablas 54 y 55 representan los resultados para el test con el objetivo colocado a 300mm. En este caso se observa como la luz afecta en la medida cuando se utiliza el objetivo claro reflectante, produciendo oscilaciones en los datos obtenidos. Tanto con el objetivo oscuro como con el claro, la amplitud del ruido es mayor que en las anteriores pruebas, debido al aumento de la distancia entre objeto y sensor. Para finalizar esta batería de tests, se aumenta la distancia hasta los 550mm, obteniendo los datos que se exponen en las ilustraciones 89 y 90 y las tablas 56 y 57. El nivel de ruido en este caso crece considerablemente con respecto al caso anterior, produciendo variaciones superiores a los 50mm tanto con objetivo oscuro como con objetivo claro. La presencia de luz externa provoca incluso, errores cuando el objeto a medir es de color claro y reflectante.

6.2.3.1. Configuración 0-200 mm. Distancia de separación 100 mm.

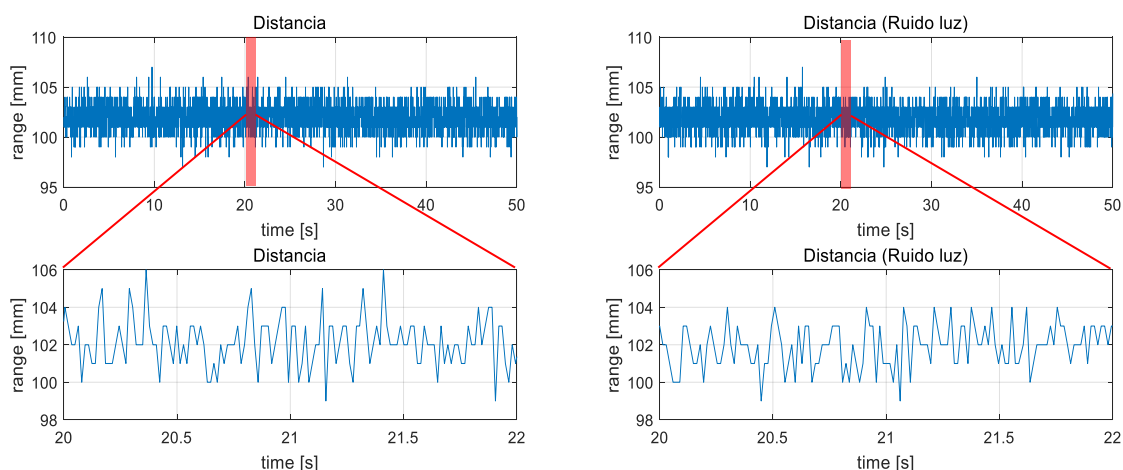


Ilustración 79. Medida estática a 100mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo oscuro.

Tabla 46. Resultados medida estática a 100mm objetivo oscuro.

	Sin interferencia	Con interferencia
Distancia máxima	107	107
Distancia media	101.99	101.93
Distancia mínima	97	97
Desviación típica	1.339	1.345

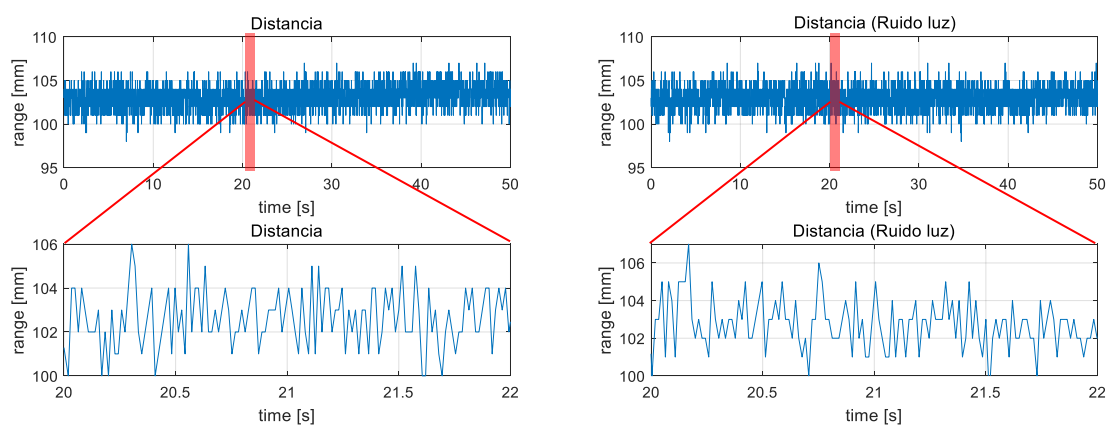


Ilustración 80. Medida estática a 100mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo claro.

Tabla 47. Resultados medida estática a 100mm objetivo claro.

	Sin interferencia	Con interferencia
Distancia máxima	107	108
Distancia media	103.09	103.14
Distancia mínima	98	98
Desviación típica	1.351	1.346

6.2.3.2 Configuración 0-200 mm. Distancia de separación 190 mm.

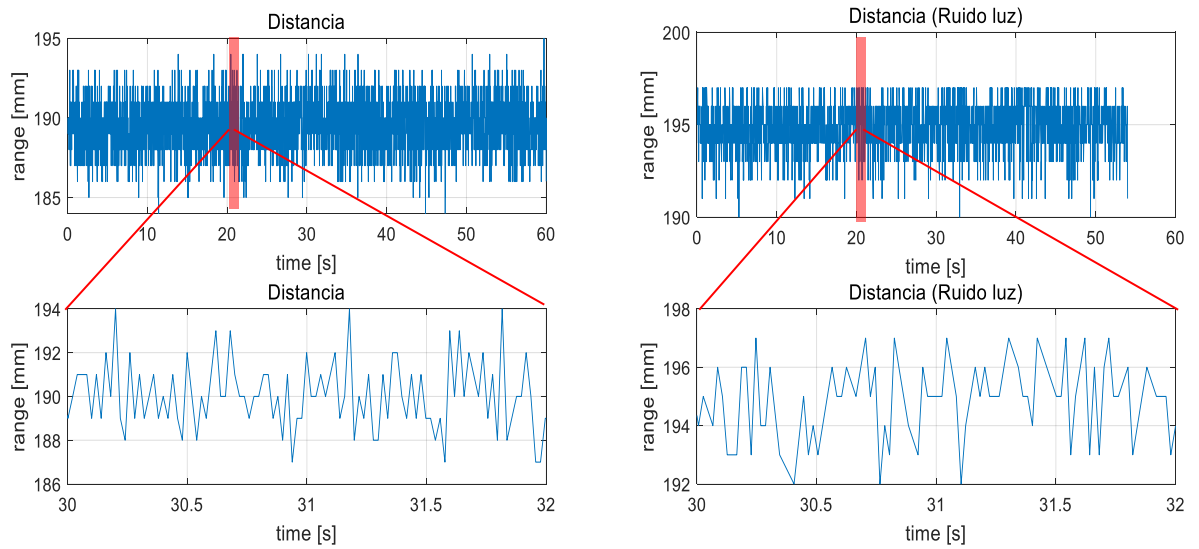


Ilustración 81. Medida estática a 190mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo oscuro.

Tabla 48. Resultados medida estática a 190mm objetivo oscuro.

	Sin interferencia	Con interferencia
Distancia máxima	195	197
Distancia media	189.51	194.88
Distancia mínima	183	189
Desviación típica	1.700	1.354

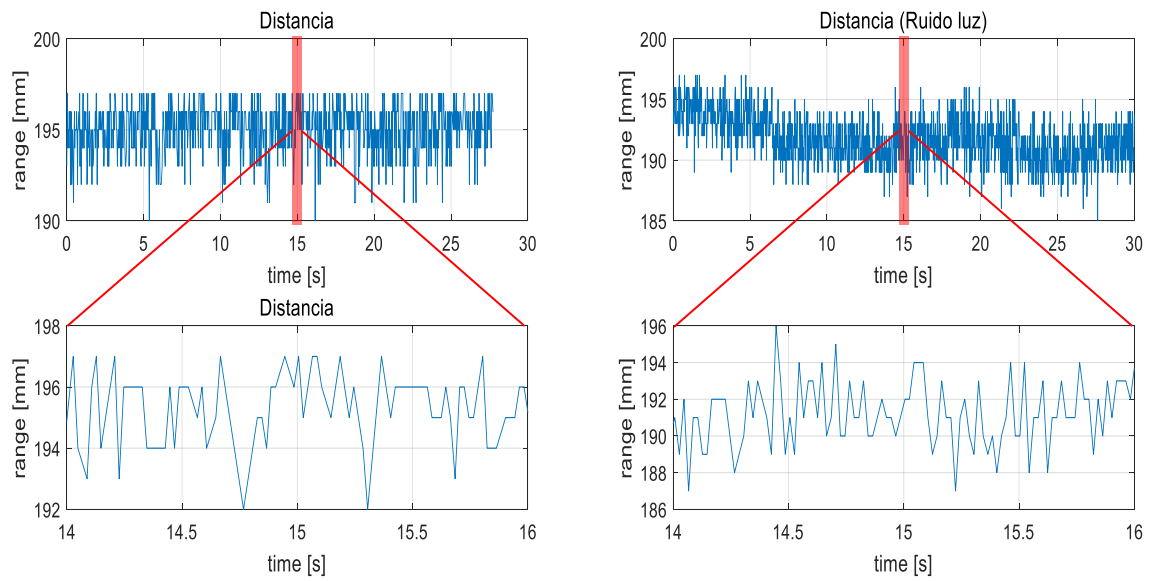


Ilustración 82. Medida estática a 190mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo claro.

Tabla 49. Resultados medida estática a 190mm objetivo claro.

	Sin ruido	Con ruido
Distancia máxima	197	197
Distancia media	195.08	191.56
Distancia mínima	190	185
Desviación típica	1.345	1.854

6.2.3.3 Configuración 0-400 mm. Distancia de separación 200 mm.

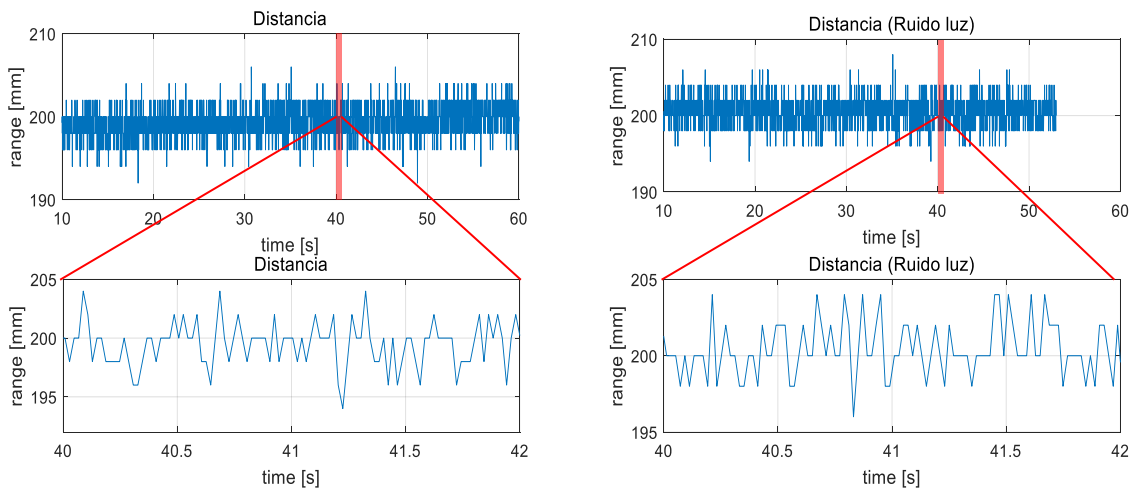


Ilustración 83. Medida estática a 200mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo oscuro.

Tabla 50. Resultados medida estática a 200mm objetivo oscuro.

	Sin interferencia	Con interferencia
Distancia máxima	206	208
Distancia media	199.41	200.53
Distancia mínima	192	194
Desviación típica	1.923	1.877

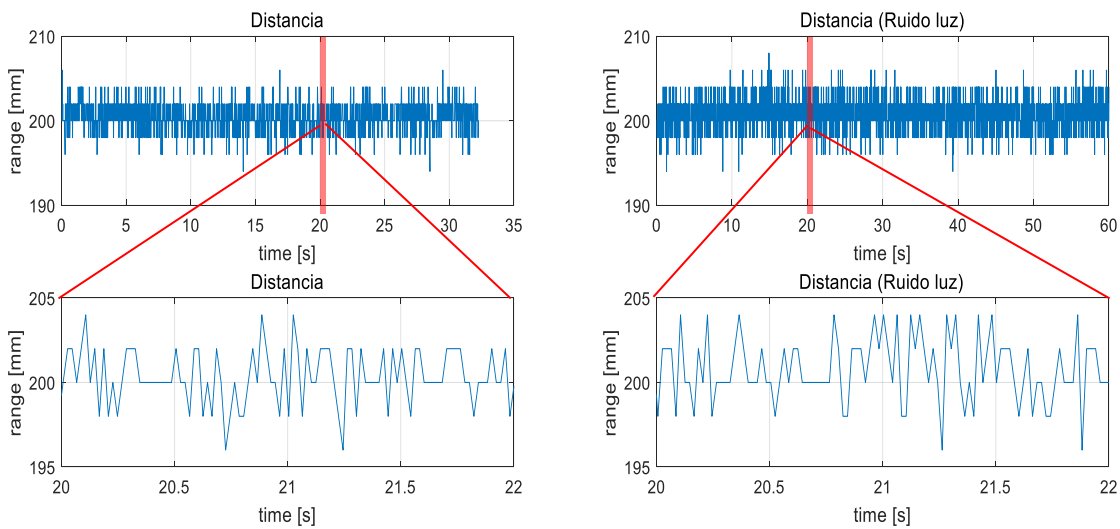


Ilustración 84. Medida estática a 200mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo claro.

Tabla 51. Resultados medida estática a 200mm objetivo claro.

	Sin interferencia	Con interferencia
Distancia máxima	206	208
Distancia media	200.41	200.75
Distancia mínima	194	194
Desviación típica	1.783	1.837

6.2.3.4 Configuración 0-400 mm. Distancia de separación 390 mm.

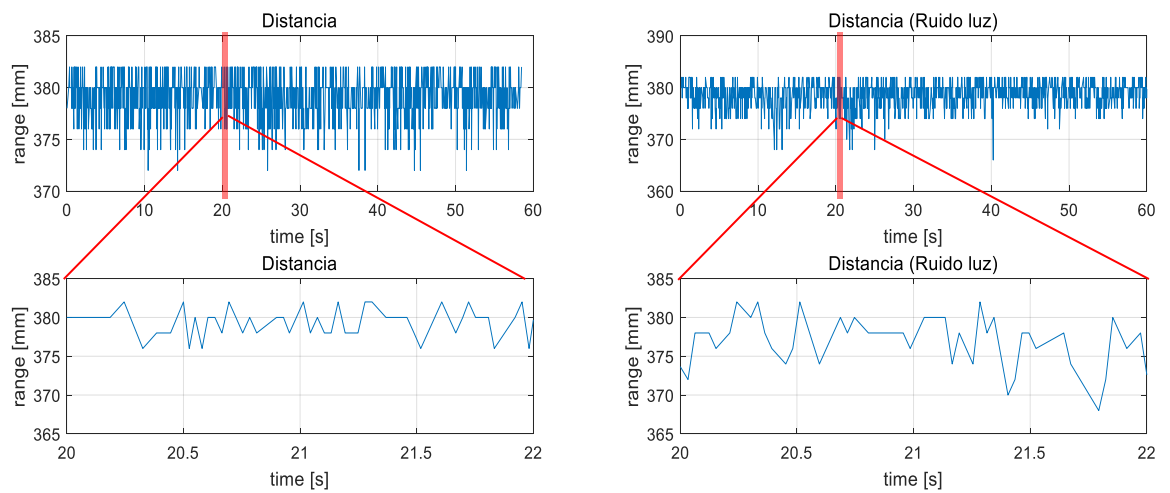


Ilustración 85. Medida estática a 390mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo oscuro.

Tabla 52. Resultados medida estática a 390mm objetivo oscuro.

	Sin interferencia	Con interferencia
Distancia máxima	382	382
Distancia media	379.12	378.70
Distancia mínima	372	366
Desviación típica	2.100	2.448

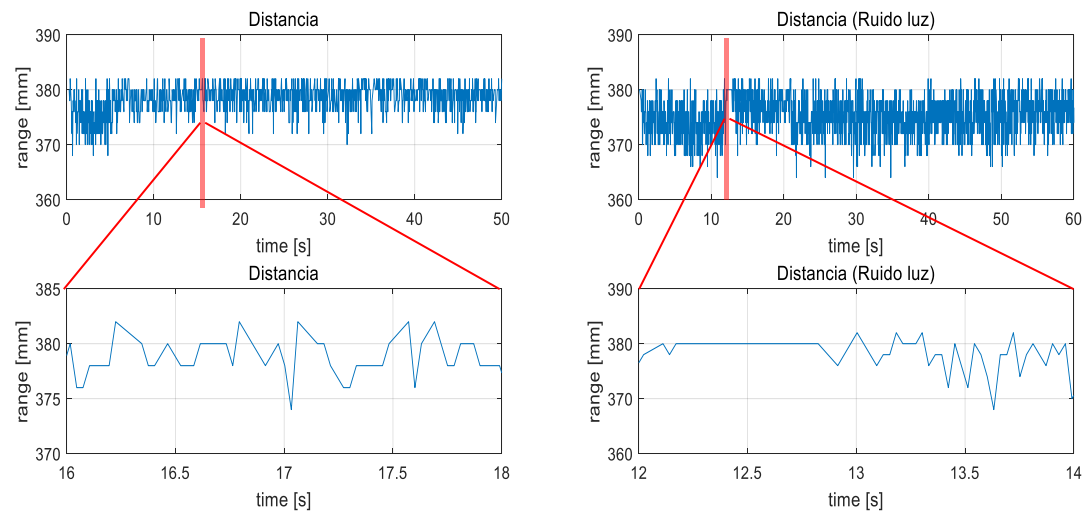


Ilustración 86. Medida estática a 390mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo claro.

Tabla 53. Resultados medida estática a 390mm objetivo claro.

	Sin interferencia	Con interferencia
Distancia máxima	382	382
Distancia media	378.28	375.23
Distancia mínima	368	364
Desviación típica	2.686	3.370

6.2.3.5 Configuración 0-600 mm. Distancia de separación 300 mm.

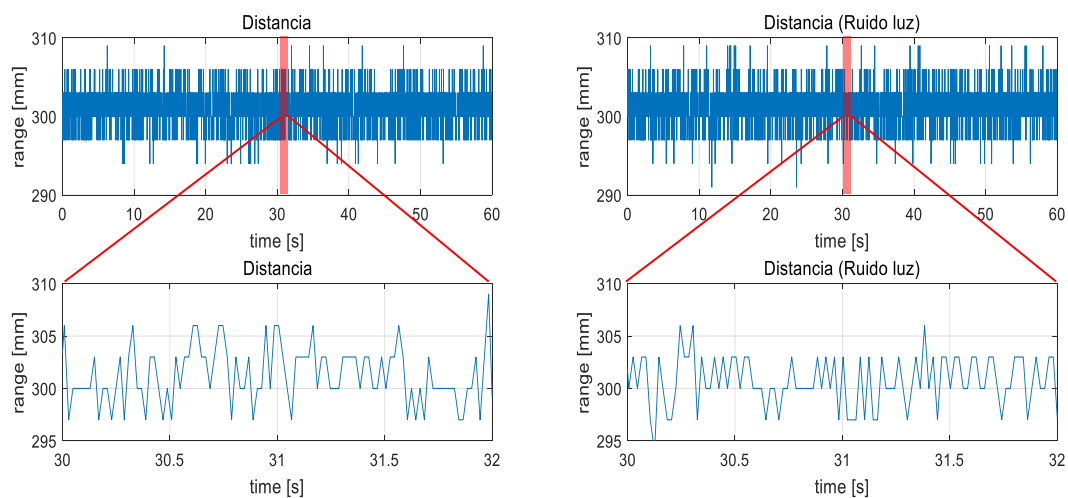


Ilustración 87. Medida estática a 300mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo oscuro.

Tabla 54. Resultados medida estática a 300mm objetivo oscuro.

	Sin interferencia	Con interferencia
Distancia máxima	309	309
Distancia media	300.99	301.14
Distancia mínima	294	291
Desviación típica	2.542	2.613

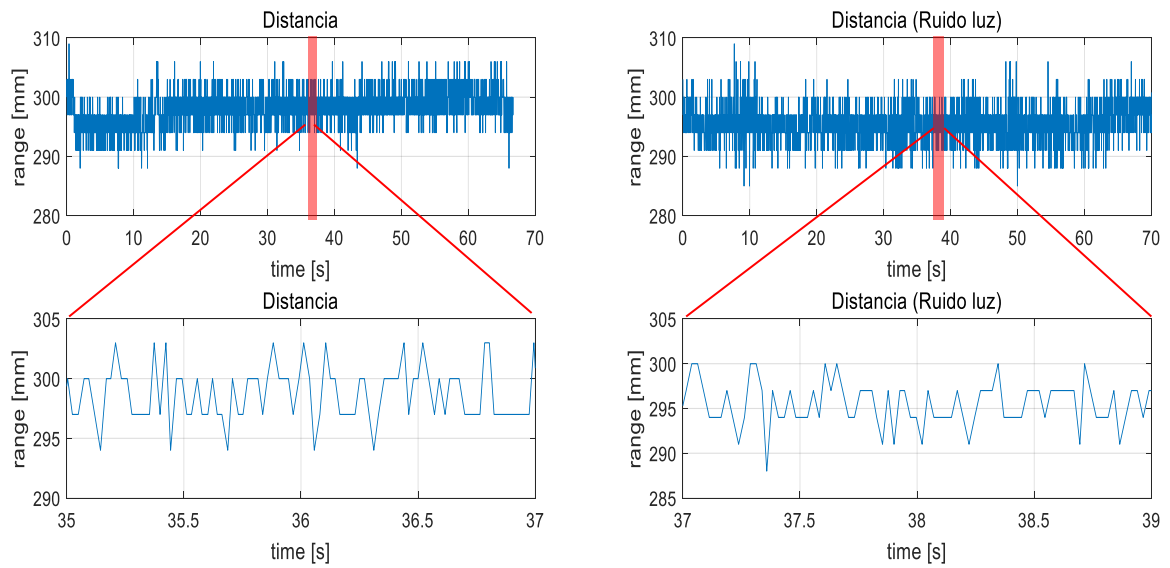


Ilustración 88. Medida estática a 300mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo claro.

Tabla 55. Resultados medida estática a 300mm objetivo claro.

	Sin interferencia	Con interferencia
Distancia máxima	309	309
Distancia media	298.15	295.52
Distancia mínima	288	285
Desviación típica	3.020	3.167

6.2.3.6 Configuración 0-600 mm. Distancia de separación 550 mm.

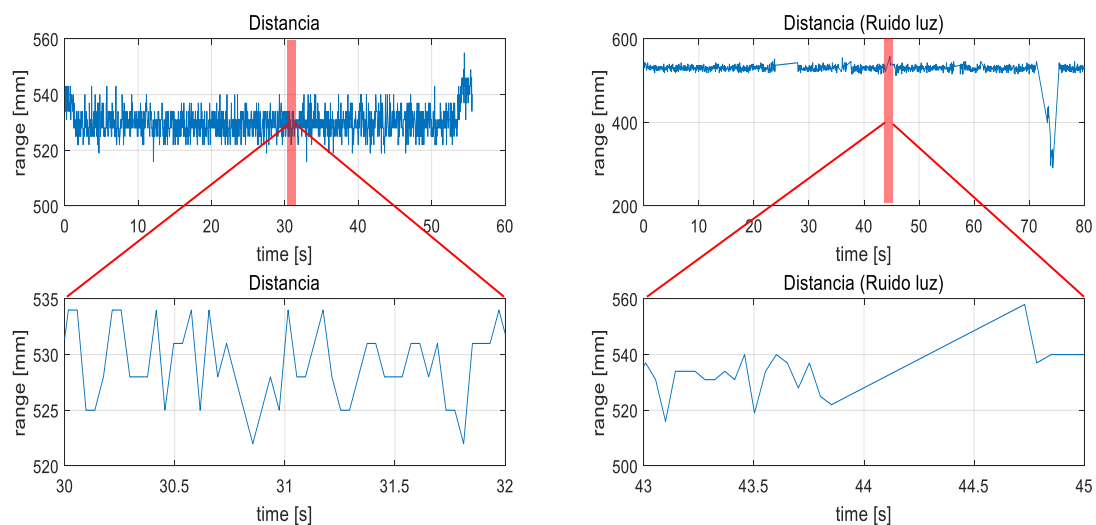


Ilustración 89. Medida estática a 550mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo oscuro.

Tabla 56. Resultados medida estática a 550mm objetivo oscuro.

	Sin interferencia	Con interferencia
Distancia máxima	556	558
Distancia media	530.19	528.86
Distancia mínima	516	291
Desviación típica	4.939	18.165

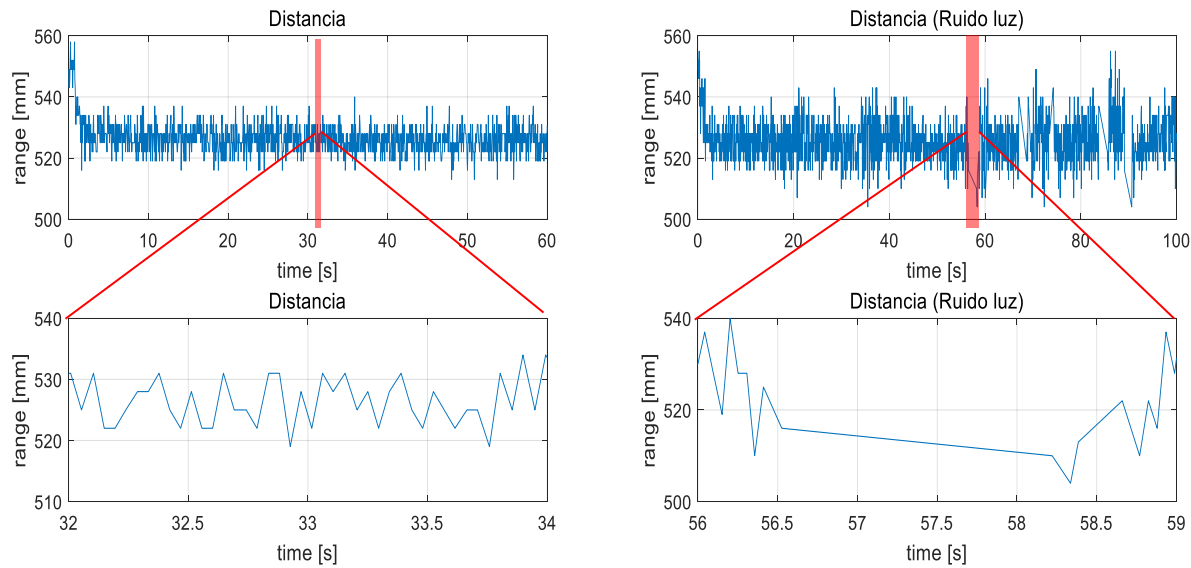


Ilustración 90. Medida estática a 550mm sin interferencia (izquierda) y con interferencia (derecha) con objetivo claro.

Tabla 57. Resultados medida estática a 550mm objetivo claro.

	Sin interferencia	Con interferencia
Distancia máxima	558	561
Distancia media	527.02	525.89
Distancia mínima	513	504
Desviación típica	5.934	7.187

7 CONCLUSIONES

En este trabajo se han planteado diferentes soluciones para la medida de deflexión de las articulaciones flexibles de brazos robóticos diseñados para manipulación aérea, evaluando aquellas que mejor se ajustan a los requisitos expuestos inicialmente.

El sensor de rango VL6180X ha demostrado no ser adecuado para medir la compresión de los muelles integrados en las articulaciones debido a su baja resolución (1 mm, siendo la compresión típica de ~5 mm), ruido en la medida, siendo casi inservible en exteriores con luz solar, baja frecuencia de muestreo y distancia mínima medible (~20 mm). No obstante, puede utilizarse para otros fines, tales como medir la distancia a objetos que deban ser agarrados por un brazo robótico, o bien para medir la compresión lineal en una articulación prismática.

El AS5047D se presenta como el mejor candidato para la aplicación, dadas sus buenas características. Sus 14 bits de resolución permiten leer variaciones de deflexión articular inferiores a los 0.03 grados, siendo tolerante incluso a excentricidades con el imán. En condiciones normales de utilización (imán centrado a 2 mm de separación) posee una elevada resistencia al ruido, muy superior a la requerida en los posibles escenarios de trabajo. Durante los experimentos ha sido posible medir con una tasa de muestreo de 500 Hz, velocidad limitada por el tiempo necesario para enviar los datos por la UART al equipo de logueo, pudiendo obtenerse tasas muy superiores. Por último, su reducido tamaño hace posible su integración de forma sencilla.

Con esto, concluye el presente trabajo de fin de máster desarrollado en el contexto del proyecto Europeo H2020 AEROARMS, contribuyendo a mejorar la capacidad de control de fuerza de los manipuladores aéreos.

REFERENCIAS

- [1] K. Kondak, F. Huber, M. Schwarzbach, M. Laiacker, D. Sommer, M. Bejar, A. Ollero. Aerial manipulation robot composed of an autonomous helicopter and a 7 degrees of freedom industrial manipulator. Proceedings of the ICRA 2014, pp. 2107–2112.
- [2] A. Jimenez-Cano, J. Martin, G. Heredia, A. Ollero and R. Cano. Control of an aerial robot with multi-link arm for assembly tasks. Proceedings of the ICRA 2013.
- [3] M. Orsag, Ch. Korpela, and Paul Oh. Modelling and Control of MMUAV: Mobile Manipulating Unmanned Aerial Vehicle (2013). Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 69, pp. 227-240.
- [4] G. Heredia, A.E. Jimenez-Cano, I. Sanchez, D. Llorente, V. Vega, J. Braga, J.A. Acosta and A. Ollero. Control of a Multirotor Outdoor Aerial Manipulator. Proceeding of IROS 2014.
- [5] Suarez, A., Heredia, G., & Ollero, A. (2015, September). Lightweight compliant arm for aerial manipulation. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 International Conference on (pp. 1627-1632).
- [6] Suarez, A., Heredia, G., & Ollero, A. Lightweight compliant arm with compliant finger for aerial manipulation and grasping. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2016 IEEE/RSJ International Conf. on.
- [7] Eiberger, O., Haddadin, S., Weis, M., Albu-Schaffer, A., & Hirzinger, G. (2010, May). On joint design with intrinsic variable compliance: derivation of the DLR QA-Joint. In ICRA (pp. 1687-1694).
- [8] Kang, S., Yun, S. K., Kim, S. J., Kim, Y. H., & Kim, M. (2005). Safe arm design with MR-based passive compliant joints and viscoelastic covering for service robot applications. Journal of mechanical science and technology, 19(10), 1835-1845.
- [9] Kang, S., Yun, S. K., Kim, S. J., Kim, Y. H., & Kim, M. (2005). Safe arm design with MR-based passive compliant joints and viscoelastic covering for service robot applications. Journal of mechanical science and technology, 19(10), 1835-1845.
- [10] A. Suarez, P. Ramon, G. Heredia, B. Arrue, and A. Ollero. (2017, September). Anthropomorphic, compliant and lightweight dual arm system for aerial manipulation. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017 International Conference on (pp. 992–997).